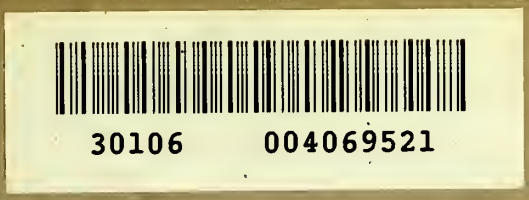
The University Library
Leeds

Medical and Dental
Library


30106 004069521

Handbuch

der

physiologischen Methodik

Unter Mitwirkung

von

L. Asher, Bern; **A. Bethe,** Kiel; **Chr. Bohr,** Kopenhagen; **K. Bürker,** Tübingen; **W. Caspari,** Berlin; **J. R. Ewald,** Strassburg; **O. Fischer,** Leipzig; **O. Frank,** München; **M. von Frey,** Würzburg; **S. Garten,** Giessen; **A. Gullstrand,** Upsala; **F. B. Hofmann,** Königsberg; **R. Magnus,** Utrecht; **L. Michaëlis,** Berlin; **W. Nagel,** Rostock; **C. Oppenheimer,** Berlin; **I. P. Pawlow,** St. Petersburg; **J. Poirot,** Helsingfors; **A. Pütter,** Bonn; **M. Rubner,** Berlin; **K. Schäfer,** Berlin; **F. Schenck,** Marburg; **J. Steiner,** Köln; **W. Trendelenburg,** Innsbruck; **W. Wirth,** Leipzig; **N. Zuntz,** Berlin und **H. Zwaardemaker,** Utrecht

herausgegeben

von

Robert Tigerstedt

[redacted]

Dritter Band

Erste Hälfte

Die sensorischen Funktionen der Haut und der Bewegungsorgane; Geruch und Geschmack; physiologische Optik; physiologische Akustik

Mit 276 Figuren im Text und 2 Tafeln

Leipzig
Verlag von S. Hirzel
1914

Digitized by the Internet Archive
in 2015

UNIVERSITY OF LEEDS
MEDICAL LIBRARY.

https://archive.org/details/b21506371_0004

603538

Inhalt.

1. Abteilung. (Sinnesphysiologie I.)

Seite

I. M. von Frey, Die sensorischen Funktionen der Haut und der Bewegungsorgane . . . . . 1—45

I. Temperaturempfindungen 1
Literatur 9
II. Druckempfindungen 11
Literatur 28
III. Schmerzempfindungen 30
1. Mechanische Reize 30
2. Thermische Reize 33
3. Chemische Reizung 33
4. Elektrische Reizung 34
5. Die Reaktionszeit der Schmerzempfindung 34
Literatur 36
IV. Bewegungs- und Lageempfindungen 36
1. Die Methoden der Gewichtsvergleichung 36
2. Die Empfindungsschwellen der Gelenkbewegungen 39
3. Unterschiedsschwelle für Bewegungen 41
4. Die Wahrnehmung der Gliederlage 43
5. Anatomische und physiologische Untersuchungsmethoden 43
Literatur 44

II. H. Zwaardemaker, Geruch und Geschmack . . . . . 46—108

I. Die Riechstoffe 46
Methodologisch wichtige Eigenschaften 46
Klassifikation der Riechstoffe 50
Lösungsmittel 53
II. Odorimetrie 55
III. Das Riechen im Experiment 58
IV. Olfaktometrie 61
Herstellung eines porösen Zylinders aus Papier 64
Herstellung eines porösen Zylinders aus Porzellan 64
Zusammenstellung des Magazinzylinders 65
Anstellung der Beobachtungen 67
Fehlerquellen 68
Theorie des Olfaktometers 70
Präzisionsmessung 73
Klinische Riechmessung 79
V. Unterschiedsschwelle, Reaktionszeit, Ermüdung 84
A. Unterschiedsschwelle 84
B. Reaktionszeit 84
C. Ermüdung 86

Seite
VI. Die Mischung von Gerüchen 87
VII. Die schmeckbaren Stoffe 91
VIII. Die Saporimetrie 93
IX. Das Schmecken im Experiment 95
a. Lokalisierende Methoden 96
b. Integrierende Methoden 99
X. Die Geschmacksmessung (die Gustometrie) 100
a. Regionäre Geschmacksmessung 100
b. Integrale Geschmacksmessung 103
XI. Der elektrische Geschmack 106
XII. Die Reaktionszeit 107
XIII. Intoxikationen des Geschmacks 107

2. Abteilung. (Sinnesphysiologie II.)

Seite
I. W. Nagel, Methoden zur Erforschung des Licht- und Farbensinnes . . . . . 1—99
A. Methoden zur Erforschung des Lichtsinns 1
I. Die Lichtquellen für physiologisch-optische Untersuchungen 1
1. Die Verwendbarkeit der einzelnen Lichtquellen 1
2. Die spektrale Zusammensetzung der Lichtquellen 7
II. Vorrichtungen zur Abstufung der Lichtintensität 10
1. Abstufung der Licht-Intensität durch Regulierung der Lichtquellen 10
2. Abstufung der Beleuchtungsintensität durch Änderung des Lampenabstandes 10
3. Die besonderen Vorrichtungen zur Abschwächung des Lichtes . . 11
III. Versuche über Lichtsinn 17
1. Dunkeladaptation 17
2. Helladaptation 17
3. Fixierpunkt 18
4. Besondere Apparate für Lichtsinnmessungen 21
5. Versuche über die Hemerolopie der Fovea 25
6. Unterschiedsschwellen des Lichtsinns 26
IV. Versuche über den zeitlichen Verlauf der Reizung des Sehorgans . . 29
1. Versuche über die Einwirkung kurzdauernder Lichtreize 29
2. Versuche über intermittierende Lichtreize 32
3. Versuche über das Abklingen der Erregung nach längerer Reizung, positive und negative Nachbilder 35
V. Versuche über Größe des Gesichtsfeldes und über Skotome 36
VI. Versuche über inadäquate Netzhautreizung 38
Literatur 39
B. Methoden zur Erforschung des Farbensinns 42
I. Die Gewinnung farbigen, insbesondere monochromatischen Lichtes . 42
1. Farbige Flammen 42
2. Strahlenfilter 43
3. Spektrale Lichtzerstreuung 55
II. Farbenmischung 63
1. Farbenkreisel 64
2. Farbenmischung ohne Farbenkreisel und ohne Spektralapparate . 66
3. Mischung von Spektralfarben im subjektiven Verfahren. Farbenmischapparate 70
4. Mischung von Spektralfarben im objektiven Verfahren 77

Seite
III. Versuche zur Duplizitätstheorie. Purkinjesches Phänomen 80
IV. Farbengleichungen; Mischungsgleichungen 83
1. Dichromatengleichungen 83
2. Die Untersuchung peripherer Netzhautteile 87
3. Peripheriewerte 88
Literatur 90
C. Methoden zur Untersuchung objektiver Lichtreizwirkungen im Auge 93
Versuche am Sehpurpur 93
Die Untersuchung der elektromotorischen Erscheinungen am Auge . . 96
Literatur 98

II. F. B. Hofmann, Raumsinn des Auges. — Augenbewegungen 100—224
Einleitung 100
I. Untersuchung der Sehschärfe 100
a. Das Auflösungsvermögen des Auges 101
1. Vorgehen bei der Messung des Auflösungsvermögens im allgemeinen 103
2. Wahl des Probeobjektes 104
3. Variation der Belichtung, bei gleichem Verhältnis der Lichtstärke von Probeobjekt und Grund 108
4. Variation des Verhältnisses zwischen Lichtstärke des Probeobjektes und des Grundes 110
5. Vergleich des Auflösungsvermögens im hell- und dunkeladaptierten Auge 111
6. Einfluß starker Belichtung der Netzhautperipherie (Blendung) . . . 113
b. Die Empfindlichkeit des Auges für Lageunterschiede (mit Ausschluß der Tiefe) 114
II. Untersuchung der optischen Lokalisierung nach Höhe und Breite 115
Vorbemerkungen 115
Allgemeines zur Methodik 116
A. Lokalisation im ebenen Sehfelde bei aufrechter Kopfhaltung und bei Ausschluß von Nebenreizen 117
a. Wahrnehmung einfachster Formen und Lokalisierung von Richtungen 117
1. Wahrnehmung der geraden Richtung 117
2. Erkennen des rechten Winkels 120
3. Lokalisierung der horizontalen und vertikalen Richtung 121
4. Optische Lokalisierung der Medianebene und der Horizontalebene der Augen 122
b. Vergleich von Längen bei Ausschluß von Nebenreizen. „Ausfüllung des blinden Fleckes“ 125
c. Vergleich von Lagen, Richtungen und Winkeln. Gedächtnis für Richtungen und Längen 127
B. Der Einfluß von Kopf- und Körperhaltung auf die optische Lokalisation. Beeinflussung der Größenschätzung durch die Lage der Blickebene . . 129
C. Einfluß von optischen Nebenreizen auf die Lokalisierung von Richtungen und auf die Schätzung von Längen 131
III. Untersuchung der Korrespondenz beider Netzhäute 137
A. Normale Korrespondenz 137
B. Das Gesetz der identischen Sehrichtungen 141
C. Anomale Netzhautbeziehung 143
IV. Untersuchung der optischen Lokalisation nach der Tiefe . . 146
A. Motive der Tiefenauslegung, die schon beim Sehen mit einem Auge in Wirksamkeit treten 146
B. Binokulare Tiefenwahrnehmung 150
a. Nachweis der binokulären Tiefenwahrnehmung und ihrer Unabhängigkeit von der monokularen Tiefenvorstellung 158
b. Wettstreit zwischen monokularem und binokularem Tiefeneindruck 161

Seite

c. Die binokulare Tiefenwahrnehmung beruht auf die Querdisparation des Netzhautbildes 164
d. Grenze der binokularen Tiefenwahrnehmung (Tiefensehschärfe) . . 164
e. Vergleich der optischen Lokalisation nach der Tiefe mit der Anordnung der Dinge im wirklichen Raum 165
1. Welche Gegenstände werden in die Kernfläche lokalisiert? Bestimmung des Horopters 165
2. Vergleich der Anordnung der Sehdinge relativ zur Kernfläche mit der Anordnung der Objekte relativ zum Horopter 167
3. Bestimmung des Abstandes der Kernfläche vom Beobachter . . 170
f. Die Beziehungen zwischen scheinbarer Größe und Entfernung der Objekte 171
Anhang. Bemerkungen über das Stereoskopieren 177
V. Sehen von Bewegungen 183
VI. Untersuchung der Augenbewegungen 189
A. Bestimmung des Drehpunktes des Auges 189
B. Bestimmung der Primärstellung und der Netzhautorientierung bei Augenbewegungen. Parallele Rollung der Augen 192
a. Das Aufsuchen der Primärstellung der Augen und des Kopfes . . 192
b. Das Studium der Abweichungen vom Listingschen Gesetze . . . 194
C. Assoziation der Augenbewegungen und ihre Lösung. Fusionsbewegungen. Einstellung der Augen bei Ausschluß des Fusionszwanges 199
D. Geschwindigkeit und Bahn der Augenbewegungen 206
E. Bestimmung der Blickfeldgrenzen. Wirkung der einzelnen Augenmuskeln 209
Literatur 211

3. Abteilung. (Sinnesphysiologie III.)

Seite

I. A. Gullstrand, Einführung in die Methoden der Dioptrik des Auges des Menschen . . . . . 1—180
I. Allgemeine Dioptrik 1
1. Das Wesen der optischen Abbildung 1
2. Die speziellen Abbildungssätze erster Ordnung 8
3. Die Abbildungsgesetze höherer Ordnung 19
4. Die Untersuchung weit geöffneter Strahlenbündel 25
5. Die Helligkeit und Begrenzung der optischen Bilder 36
6. Das Auge in Verbindung mit optischen Instrumenten 47
II. Objektive Beobachtungsmethoden 55
1. Ophthalmoskopie 55
2. Methoden zur Beobachtung der durchsichtigen Medien und der brechenden Flächen 90
3. Parallaktische Methoden 100
III. Entoptische Beobachtungsmethoden 113
1. Methoden zur Beobachtung der Strahlenvereinigung 113
2. Methoden zur Beobachtung des im Auge entstehenden falschen Lichtes 125
3. Methoden zur Beobachtung entoptischer Objekte 129
IV. Messungsmethoden 140
1. Optometrische Methoden 140
2. Ophthalmometrie 149
V. Spezielle Methoden zur Erforschung des Akkommodationsmechanismus 173

II. J. R. Ewald, Die nicht-akustischen Funktionen des inneren Ohres . . . . . 181—203
I. Periode 181
II. Periode 183

Seite
A. Operationen an Evertebraten und Fischen 183
B. Operationen an Fröschen 184
1. Die Operation von der Mundhöhle aus 185
2. Die Operation vom Rücken aus 189
C. Operationen an Tauben 191
D. Die Entfernung des Labyrinths bei Hunden, Katzen, Kaninchen . . . 193
E. Durchschneidung des Nervus VIII 194
F. Untersuchung einzelner Teile des Labyrinths 195
1. Plombierung der Bögen 196
2. Reizungen des Labyrinths 197
3. Chemische Eingriffe 199
4. Thermische Eingriffe 199
5. Elektrische Eingriffe 199
Literatur 200

III. K. L. Schaefer, Untersuchungsmethodik der akustischen Funktionen des Ohres . . . . . 204—394

I. Äußeres Ohr 204
1. Die Ohrmuschel 204
2. Der Gehörgang 206
II. Mittelohr 207
1. Das Trommelfell 207
2. Die Gehörknöchelchenkette 214
3. Die Binnenohrmuskeln 218
4. Die Paukenhöhle als Luftraum und die Tuba Eustachii 223
III. Inneres Ohr: Gehörsempfindungen 227
A. Physikalisch-Technisches 227
1. Tonerzeugungsmittel 227
a. Die Bezold-Edelmannsche kontinuierliche Tonreihe 228
b. Stimmgabeln 235
c. Saiten 246
d. Labialpfeifen und Gebläseeinrichtungen 250
e. Zungen 262
f. Sirenen 272
2. Resonanz und Resonatoren 285
3. Interferenzapparate 294
4. Schwingungszahlenbestimmung 299
Tabellen. I. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft . 322
II—VI. Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter 323
VII—IX. Schwingungszahlen der temperierten 12-stufigen Leiter 328
X—XII. Schwingungszahlen der enharmonischen Leiter . . 330
B. Speziell Physiologisches 331
1. Tiefste Töne und Bestimmung der unteren Hörgrenze 331
2. Höchste Töne und Bestimmung der oberen Hörgrenze 334
3. Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen 344
a. Bei aufeinanderfolgenden Tönen 344
b. Bei gleichzeitigen Tönen 347
4. Intensitätsschwellen und Hörschärfemessung. Unterschiedsempfindlichkeit für Intensitäten 348
a. Bei Tönen 348
b. Bei Geräuschen 364
5. Kürzeste Töne. Anklingen der Tonempfindung 369
6. Abklingen der Tonempfindung. Tonunterbrechungen 377
7. Schwebungen und Zwischentöne 382
8. Kombinationstöne 386

1. Abteilung:

Sinnesphysiologie I

I.

Die sensorischen Funktionen der Haut und der Bewegungsorgane

von

M. v. Frey in Würzburg.

(Mit 31 Textfiguren.)

I. Temperaturempfindungen.

Zur Untersuchung der Qualität und Intensität der Temperaturempfindungen und der Bedingungen, unter denen sie entstehen, sind zumeist Flüssigkeiten oder feste Körper von möglichst konstanter, aber beliebig einstellbarer Temperatur benutzt worden. E. H. Weber ('**46**, '**51**)*) verwandte vorwiegend Wasser in Form von Hand- und Fingerbädern, Eingießungen usw., hat aber zuweilen auch Öl (94) bezw. mit Öl gefüllte Glasgefäße (99), sowie Metallgeräte (44, 94, 99), gebraucht. Im allgemeinen hat er große Massen dieser Stoffe zu den Versuchen benutzt, weil dadurch die Einhaltung einer bestimmten Temperatur besser gewährleistet ist. Ähnlicher Verfahrungsweisen wie Weber bediente sich K. Vierordt ('**71**). E. Hering ('**77**) hat bei seinen Untersuchungen zur Theorie des Temperatursinnes neben der Wirkung bestimmter Temperaturen, vor allem die Bedeutung der physikalischen Eigenschaften der Medien in der Umgebung der Haut oder in Berührung mit ihr (Wärmeleitung, Kapazität, Feuchtigkeitsgrad, Dichte, Oberflächenbeschaffenheit) erörtert und vielerlei Materialien und Versuchsanordnungen herangezogen, um die Temperatur der Haut in dem gewünschten Umfange zu verändern.

Nachdem schon Weber (mittels ölgefüllter Glasgefäße und Metallstäbe) die großen örtlichen Unterschiede der Haut in bezug auf ihre Empfindlichkeit gegen thermische Reize hervorgehoben hatte (99), sind dieselben durch Blix und bald darauf auch von Goldscheider und Donaldson zum Gegenstand besonderer Studien gemacht worden, ausgehend von der Vermutung, daß für die Empfindung von Kälte und Wärme verschiedene nervöse Apparate verantwortlich zu machen seien. Es entstand damit die Aufgabe, die thermischen Reize auf eine möglichst kleine Fläche zu beschränken.

Blix ('**82**, '**84**) erfüllte diese Aufgabe durch unipolare, faradische Reizung mittels einer feinen Metallspitze ('**84**, 145), ferner für die kaltempfindenden

*) Der Hinweis auf das Literaturverzeichnis am Schlusse des Abschnittes geschieht durch abgekürzte Jahreszahlen ('**46** = **1846**, '**03** = **1903**) und wenn nötig, noch durch A. B. usw. Die nicht fett gedruckten Zahlen sind Seitenzahlen.

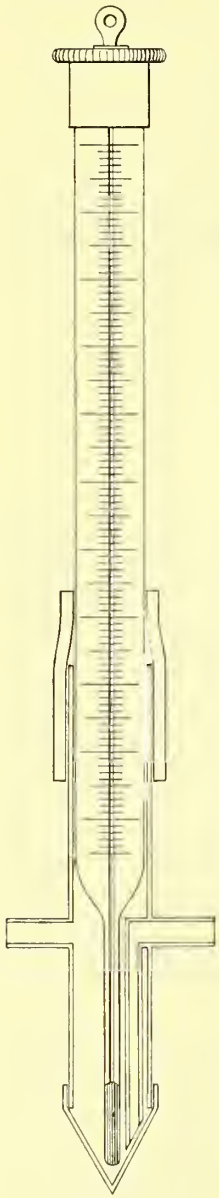


Fig. 1.

Metallkonus nach Blix, etwas verändert. Das Thermometer zeigt die Temperatur des durchgeleiteten Wassers, der Konus ist auswechselbar gegen Ansatzstücke in Form eines Kegelstutzes mit verschieden großer Endfläche.

Hautstellen (Kaltpunkte) durch Berührung mit stumpfen Drähten von Zimmertemperatur (152), nassen Fäden (147), Aufsetzen von kleinen Wassertröpfchen (147). Für die isolierte Reizung einzelner Warmpunkte benutzte er einen hohlen Metallkonus mit stumpfer Spitze (153), durch den Wasser von geeigneter Temperatur geleitet wurde (Fig. 1).

Goldscheider ('84, '85) reizte die Kaltpunkte mit feinen in Äther getauchten Pinseln (54, 108), fand den Reiz aber zu schwach, um alle kaltempfindlichen Hautstellen nachzuweisen. Dies gelang dagegen mit hohlen oder soliden Messingzylindern, die abgekühlt, bezw., wenn es sich um Reizung der Warmpunkte handelte, erwärmt waren (54, 108). Zur mechanischen Erregung der Temperaturnerven dienten ihm Glasnadeln oder spitze Hölzchen, die auf die Haut aufgestoßen wurden. Zur Erregung tiefliegender Nerven fand er Korkstücke bezw. einen Korkhammer brauchbar (65, 136). Die faradische Erregung einzelner Temperaturpunkte bewerkstelligte er wie Blix. Zur isolierten gleichzeitigen Erregung mehrerer Temperaturpunkte trug er auf die vorher bezeichneten Punkte etwas Eisenfeile auf und brachte diese in leitende Verbindung mit der Elektrode (68, 123). Die Analgesie der Temperaturpunkte prüfte er mit spitzen Nadeln (71, 124).

Donaldson ('85) verwendete Metallstäbe sowie den Konus von Blix, außerdem aber noch einen Thermokauter, durch dessen Strahlung er die Warmpunkte erregte. Zur örtlichen Beschränkung des letzteren Reizes diente ein „thermally opaque diaphragm" mit einer Öffnung von 2 mm Durchmesser. Letzteres Verfahren, doch mit weiterem Diaphragma, hat schon S. Pollitzer ('84) angewendet. Donaldson schloß aus der zur Entstehung der Wärmeempfindung nötigen Annäherung des Thermokauters an die Haut, auf deren Wärmeempfindlichkeit. Die topographische Aufnahme der empfindlichsten Flächenelemente suchte Donaldson dadurch genau und vollständig zu machen, daß er dem Blixschen Konus eine mechanische Führung gab, so daß er, wie das Eisen einer Hobelmaschine, über die festgelegte Haut hinwegglitt.

Die Verfahrungsarten von Blix und Goldscheider sind späterhin stets in Verwendung gekommen, wo es sich um den Nachweis, die Lage, Dichte und Empfindlichkeit der Kalt- und Warmpunkte handelte. So haben Alrutz ('97, 323 und '08, 167), Kiesow ('99) und viele andere den Konus von Blix, Alrutz ('97) die Metallstäbe von Goldscheider benutzt. Für Konjunktiva

und Kornea verwendete v. Frey ('95) sehr dünne Drähte mit angeschmolzener Metallperle, Kupferscheibchen, die an einer Borste befestigt waren (168), temperierte Reizhaare (169) und kleine mit Vaseline getränkte Wattebäuschchen (170). Durch diese Einrichtungen konnte die Schmerzhaftigkeit der Berührung wesentlich verringert bezw. vermieden werden. Noch besser gelingt dies, wenn man Luft aus einer feinen Spitze ausströmen läßt, wie dies W. Nagel ('95, 586) angegeben hat. Weniger leicht ist hierbei die Beschränkung des Reizes auf sehr kleine Flächen. Frei von mechanischer Erregung und gut lokalisierbar ist der Gebrauch eines Brennglases (Alrutz, '97, 333). Die Abstufung der Reizstärke geschieht hierbei durch Drehung der Linse um eine zu den Lichtstrahlen senkrechte Achse (Alrutz) oder durch eine mit der Linse verbundene Irisblende (v. Frey). Auch Wassertropfen, deren Größe und Temperatur verändert werden kann und die aus 1 cm Abstand auf die Haut fallen, bilden ein thermisches Reizmittel von guter Abstufbarkeit (Toulouse und Vaschide ('00)). Die mechanische Reizbarkeit, insbesondere der Kaltpunkte, ist von Alrutz ('97, 327) bestätigt worden. Er bediente sich dazu des Verfahrens von Goldscheider.

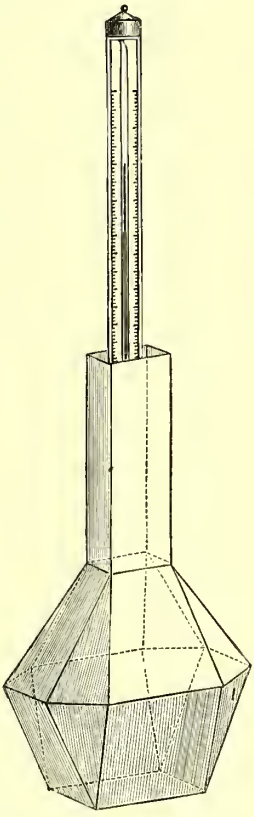


Fig. 2.

Polyedrisches Kölbchen aus Kupferblech nach Leegaard zur großflächigen thermischen Reizung der Haut.

Die Dichte der Temperaturpunkte an verschiedenen Körperstellen ist von G. Sommer ('01) ermittelt worden.

Neben den kleinflächigen thermischen Reizen haben indessen auch solche von größerer Wirkungsfläche ihre Berechtigung, wo es sich um eine Untersuchung ausgedehnter Hautgebiete, insbesondere von klinischen Gesichtspunkten aus handelt. Eulenburg ('66, '84, '85) verwendete (zur Messung der Unterschiedsempfindlichkeit) Thermometer mit flachscheibenförmigem Quecksilbergefäß mit 1,3 cm^2 Bodenfläche. Goldscheider (159) findet Flächen von 0,3–0,4 cm^2 am vorteilhaftesten (ob Metallstäbe oder wasserdurchflossene Röhren wird nicht gesagt). Leegaard ('89, '91) hat zur Bestimmung der Indifferenzbreite kupferne Kölbchen von polyedrischer Gestalt mit Wasser gefüllt und auf verschiedene Temperaturen eingestellt. (Fig. 2). Die Reizfläche betrug 9 cm^2. Head und Sherren ('05, 8), sowie Rivers und Head ('08, 28) benutzten mit temperiertem Wasser gefüllte Silberröhren mit ebenem Boden von 1,2 cm^2 Fläche.

Die bisher aufgezählten thermischen Reizmittel sind sämtlich solche von stationärer oder doch annähernd stationärer Temperatur. Der Erfolg ist aber nicht allein von der Temperatur, sondern auch von dem zeitlichen Ablauf der Wärmebewegung abhängig, was sich u. a. darin zeigt, daß von 2 Körpern gleicher Temperatur (z. B. Holz und Metall) der besser Leitende stärker erregt. Taucht man die Haut in eine größere Wassermasse von

abweichender Temperatur, so wird die Wärmebewegung durch die Haut und ebenso ihre Temperatur dauernd verändert; trotzdem ist die Empfindung zeitlich begrenzt, weil, wie Hering ('77) hervorgehoben hat, eine Verschiebung des physiologischen Nullpunktes stattfindet. Für manche Fragestellungen, besonders für wiederholte Reizungen derselben Hautfläche sind daher Reize von rasch wachsender und wieder abnehmender Intensität vorteilhafter, weil weniger umstimmend. Ein solcher Reiz wird gesetzt, wenn ein Körper von geringer Masse und Wärmekapazität, aber guter Wärmeleitung und von einer Temperatur, die verschieden ist von der an der Oberfläche der Haut herrschenden, mit letzterer in Berührung gebracht wird. Ist er z. B. kühler als die Haut, so wird die Temperatur der letzteren an der Berührungsstelle zuerst rasch sinken, dann langsam wieder steigen. Der zeitliche Verlauf der Temperaturänderung an der Hautoberfläche kann bei gleicher Berührungsfläche und gleichem Material dargestellt werden als eine Funktion der Wärmemengen, die bis zum Ausgleich der Temperaturen übergeführt werden müssen. In dieser Dimension des Reizes sind dann die veränderliche Masse und die veränderliche Ausgangstemperatur, bezw. die Temperaturdifferenz zwischen Haut- und Reizgerät zusammengefaßt. Eine genauere, namentlich quantitative Untersuchung dieser Verhältnisse steht noch aus.

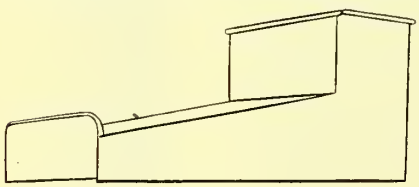


Fig. 3.

Wasserbad mit schräganssteigender oberer Fläche zur Erwärmung der Reizlamellen auf 100° (Thunberg).

Die Ermittlung der fraglichen Wärmemengen für eine bestimmte Versuchsanordnung hat L. F. Barker ('96 A, 349, 352) ausgeführt. Bei Verwendung kleiner Stückchen feinen Kupferdrahtes fand er die zur Erregung der Kaltpunkte nötige kleinste Wärmeentziehung gleich 2,4 Mikrokalorien.

In sehr zweckmäßiger Weise hat Thunberg ('94; '01, 386; '05, 82), die der Masse proportionale Wärmemenge ungleich dicker Silber- (oder Kupfer-) bleche von gleicher Fläche benutzt, um die Temperaturänderung verschieden tief in die Haut eindringen zu lassen. Die als „Reizlamellen" bezeichneten Bleche sind auf Korkstücken als Handgriffen befestigt und werden durch ein Wasserbad geeigneter Bauart auf konstanter Temperatur, meist 100°, gehalten (Fig. 3). Um die Wirkung der Reizlamellen noch gleichmäßiger zu gestalten, stellte Thunberg ('94; '01, 385) auch die Temperatur der zu prüfenden Hautstelle auf eine bestimmte, willkürlich zu wählende Höhe ein mit Hilfe des Temperators (Fig. 4). Derselbe besteht aus einer flachen Metalldose von 22 cm² ebener Bodenfläche, durch die Wasser von konstanter Temperatur fließt, während ein in den Dosenraum eintauchendes Thermometer gestattet, die Temperatur jederzeit abzulesen. Ein kleinerer Temperator (16 cm² Bodenfläche) diente zuweilen zur thermischen Erregung der Haut, nachdem ihre Temperatur durch den größeren Temperator auf den gewünschten Ausgangsgrad gebracht worden war ('01, 425). Durch die erwähnten Einrichtungen ist es Thunberg gelungen, die paradoxe Kälteempfindung bei flächenhafter Reizung beliebiger Hautstellen durch Wärme hervorzurufen und gute Beweise für die ungleiche Tiefenlage der Nervenenden für Schmerz, Kälte und Wärme beizubringen.

K. G. Holm hat bei seiner Untersuchung der Dauer der Temperaturempfindungen, sowie der zurückbleibenden Temperaturempfindungen (**03**, 242 u. 249) auf den Rat Thunbergs dessen Temperator (14 cm^2) vervollkommnet durch einen diesen umschließenden Hohlring, durch den Wasser von indifferenter Temperatur geleitet wurde. Es ist auf diese Weise möglich, die Erwärmung oder Abkühlung der zu prüfenden Hautfläche vorzunehmen, ohne daß eine Ausbreitung auf benachbarte Hautbezirke eintritt. (Fig. 5).

Alrutz (**08**, 165, 191), der von dem Temperator vielfach Gebrauch gemacht hat (s. u.), hat ihm zum Teil eine noch kleinere Bodenfläche und für

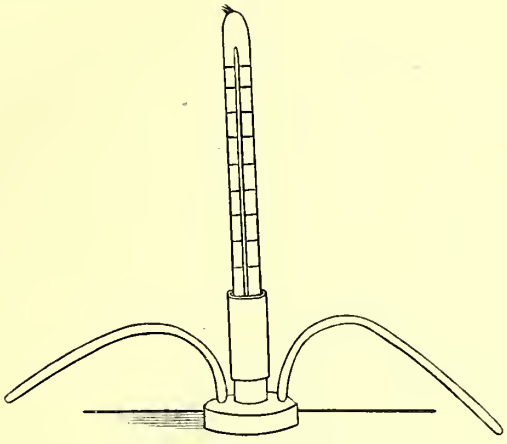


Fig. 4.
Temperator zur Einstellung der Haut auf eine bestimmte Temperatur (Thunberg).

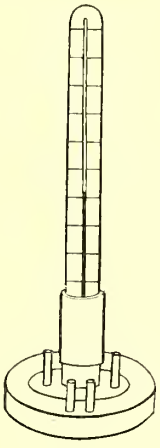


Fig. 5.
Temperator mit umschließendem Hohlring u. selbständiger Wasserzuführung (Holm).

die Untersuchung der Mundhöhle und der Lippen auch eine etwas andere Form gegeben.

Versuche über die Wirkung thermischer Eingriffe, welche nicht von der Epidermis, sondern von dem Unterhautzellgewebe aus auf die Nervenenden einwirken, sind ausgeführt worden von Goldscheider (**85**, Ges. Abh. I, 139), Dessoir (**92**, 255) und Imamura (**03**, 233). Goldscheider und Imamura machten mit der Pravazspritze Injektionen von thermisch differenten Lösungen; Dessoir führte Nadeln ein, mit denen er die temperaturempfindlichen Apparate mechanisch und elektrisch zu erregen versuchte. Imamura hat die an der Hautoberfläche auftretenden Temperaturänderungen thermoelektrisch gemessen. Goldscheider hat auch die Wirkung thermischer Reize geprüft auf die durch die Entfernung der Epidermis bloßgelegte Cutis (**86** B, Ges. Abh. I, 262).

Die Bestimmung der Reaktionszeit von Temperaturempfindungen ist zuerst von Herzen versucht worden (**79**; **85**, 95), welcher sie nach einem

nicht näher beschriebenen Verfahren für Kältereize kaum doppelt, für Wärmereize mindestens dreimal so lang fand als auf Berührung mit thermisch indifferenten Körpern. Zu den Messungen von Donaldson ('85, 411) diente die Einwirkung der strahlenden Wärme eines Paquelin auf die Haut. Die örtliche Begrenzung geschah durch einen Schirm mit Öffnung von 2 mm Durchmesser; die Entfernung des Glühkörpers von der Haut betrug 8 mm. Von der Freigabe der Öffnung bis zum Ansprechen der Warmpunkte verstrichen etwa 3 Sekunden, während Kaltpunkte und thermisch indifferente Flächenelemente der Haut, wenn überhaupt, erst nach viel längerer Zeit und dann nur äußerst schwach ansprachen. Kältereize wurden nicht geprüft. Weitere Beobachtungen hat Tanzi mitgeteilt ('86). Er vermied Berührungen und wählte Kälte- wie Wärmereize von solcher Stärke, daß sie an der Schmerzgrenze lagen. Für erstere benutzte er Dichlormethan, für letztere die Hitze einer Flamme. Der Beginn der Einwirkung fiel zusammen mit der Entfernung eines Schirmes, durch den das Chronoskop in Gang gesetzt wurde. v. Vintschgau und Steinach ('87, 367; '88, 152) verwendeten zu ihren Messungen einen kleinen von Wasser durchflossenen metallischen Zylinder von etwa 0,8 cm² Grundfläche, der an einem Handgriff so befestigt war, daß er beim Aufsetzen auf die zu prüfende Hautstelle einen galvanischen Strom schloß. Der Reagent beantwortete die durch den Reiz gesetzte Temperaturempfindung mit der Unterbrechung des Stroms.

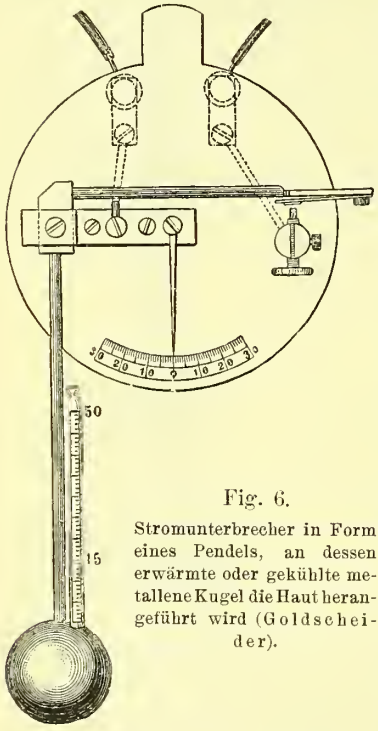


Fig. 6.
Stromunterbrecher in Form eines Pendels, an dessen erwärmte oder gekühlte metallene Kugel die Haut herangeführt wird (Goldscheider).

In eingehender Weise hat Goldscheider ('88, Ges. Abh. I, 312—340) die Reaktionszeiten der Temperaturempfindungen untersucht. Die zu prüfende Hautstelle wurde an die abgekühlte oder erwärmte Kugel eines kleinen Pendels herangeführt, wobei ein Stromkreis geöffnet wurde (Fig. 6). Der Reagent signalisierte den Eintritt der Empfindung durch einen Beißkontakt. Goldscheider hat namentlich auf den großen Einfluß hingewiesen, den die thermische Empfindlichkeit der geprüften Hautstelle sowie die Temperaturdifferenz zwischen Haut und Kugel auf die Länge der Reaktionszeit ausübt.

Die Entdeckung der paradoxen Kälteempfindung hat dann Gelegenheit gegeben, die Reaktionszeiten bezw. Apperzeptionszeiten für die Empfindungen warm und kalt auf ein und denselben Reiz, Temperaturen von 45° und und darüber, zu vergleichen. Thunberg ('01, 414) stellte, ohne Zeitmessungen auszuführen, fest, daß je nach der Höhe der reizenden Temperatur, dann aber auch je nach der Ausgangstemperatur der Haut die Wärmeempfindung früher, gleichzeitig mit oder später eintritt als die Kälteempfindung.

Sehr sorgfältige Messungen der Reaktionszeit für Wärme-, Hitze- und paradoxe Kälteempfindungen hat Alrutz ('08) mitgeteilt. Die Versuchsanordnung ist ähnlich der von Thunberg für Schmerzreaktionen gebrauchten (s. u.). Der reizende Apparat, Temperator oder Blixscher Konus, schloß den Strom zum Chronoskop; der Eintritt der Empfindung wurde vom Reagenten durch Stromöffnung angezeigt. Neben konstanten individuellen Unterschieden sowie solchen zwischen verschiedenen Hautgebieten zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Reaktionszeiten für Hitze und paradoxe Kälte, während die für Wärme stets beträchtlich kürzer ausfielen. Die Abhängigkeit der Reaktionszeit von der reizenden Temperatur wurde nur für die Hitzeempfindung näher verfolgt (a. a. O. S. 176).

Bei dem großen Einfluß, den nach Goldscheider ('88) die Empfindlichkeit der geprüften Hautstelle auf die thermische Reaktionszeit ausübt, dürfte letztere auch das beste objektive Maß abgeben zur Bestimmung der Stärke des Temperatursinnes an verschiedenen Körperstellen sowie zur sicheren Feststellung von pathologischen Abweichungen. Freilich geht die Dicke der Epidermis als maßgebender Faktor in die Bestimmung ein; die Größe dieses Einflusses dürfte indessen wohl einer Messung zugänglich sein. Die „Untersuchungen über die Wärmeleitung der Haut" von Klug ('74) können als ein Anfang in dieser Richtung betrachtet werden. Bei Messung an gleichen Hautstellen fällt dieser Einfluß fort. Eine auf der Stärke der Temperaturempfindungen gegründete Topographie der Temperatursinne ist in ihren wesentlichen Zügen von E. H. Weber ('51, 98—99), Nothnagel ('67) und Eulenburg ('85, 174) entworfen worden. In umfassender Weise hat Goldscheider ('87 B) sie darzustellen gesucht, indem er für den Kältesinn 12, für den Wärmesinn 8 „Empfindlichkeitsgrade" aufstellte. Die Unsicherheit der rein subjektiven Beurteilung und die sonstigen Mängel des Verfahrens sind von Alrutz ('08, 253) erörtert worden. Thunberg hat dann auf die Notwendigkeit hingewiesen ('04), die Ausgangstemperatur der zu prüfenden Hautstellen gleichzumachen. Dies ist von Alrutz in seiner Untersuchung der Topographie des Wärmesinns ('08, 274) mit Hilfe des großen Temperators geschehen. Erst nach Adaptation der Hautstelle an dessen Temperatur wurde der kleinere (reizende) Temperator aufgesetzt. Es muß auch als ein Vorzug der Prüfung von Alrutz betrachtet werden, daß er sich mit der Aufstellung einer geringen Zahl von Intensitätsstufen der Empfindung begnügte.

Die Prüfung der **Unterschiedsempfindlichkeit** für Temperaturen wird durch das weitgehende Anpassungsvermögen der peripheren Organe an die Temperatur der Umgebung sehr erschwert. Es kann sogar geschehen, daß von 2 verglichenen Temperaturen die der Hauttemperatur näherliegende aufhört fühlbar zu sein, worauf der Versuch nicht mehr eine Unterschiedsschwelle, sondern eine Empfindungsschwelle liefert. Keines der bisher geübten Verfahren hat diese Fehlerquelle mit Sicherheit vermieden und es lag hierzu auch keine Veranlassung vor, da zur Zeit der fraglichen Versuche die Zweiteilung des Temperatursinnes und das Vorhandensein einer verschieblichen Indifferenzstrecke noch nicht erkannt war. Die Temperaturvergleichung wurde gewöhnlich durch Eintauchen der Hand oder einzelner Finger in Wasserbäder verschiedener Temperatur vorgenommen

(E. H. Weber ('51, 554); Lindemann ('57), Fechner ('60), Alsberg ('63), Nothnagel ('67), Kesseler ('84), vgl. Thunberg ('04, 686/687)). Zum Vergleich des Unterscheidungsvermögens verschiedener Hautgebiete setzte Nothnagel Holzgefäße mit dünnen Kupferböden auf, die mit verschieden temperiertem Wasser gefüllt waren (a. a. O.). Eulenburg benutzte sein bereits oben erwähntes Thermästhesiometer, bestehend aus 2 Thermometern mit flachscheibenförmigen Quecksilbergefäßen ('66, '84, '85).

Methodisch wichtig ist, daß, wie Weber fand, die Unterscheidung viel feiner ist, wenn die beiden Temperaturen hintereinander auf dieselbe Hautfläche wirken als gleichzeitig auf 2 verschiedene Flächen.

Die Wahrnehmbarkeit **örtlicher Unterschiede** an Temperaturempfindungen ist stets mit Verfahrungsarten untersucht worden, die sich an den Zirkelversuch von E. H. Weber anlehnen. Czermak ('55, 500) bestimmte zuerst mit Hilfe des Zirkels die Größe des Bezirkes, innerhalb welches die gleichzeitigen und gleichen Eindrücke der Zirkelspitzen zu einer einzigen Empfindung verschmolzen. Der Bezirk wurde mit Tusche umrissen. Auf 2 beliebige Punkte desselben wurden dann 2 sehr kleine Reagensgläschen aufgesetzt, von denen das eine mit heißem Öl, das andere mit einer Kältemischung gefüllt war. Die beiden ungleichen Empfindungen wurden wahrgenommen, eine räumliche Sonderung war aber nicht möglich. Rauber ('69) legte auf die Haut Brettchen mit Bohrlöchern in verschiedenem Abstande. Die Hautstellen unter den Bohrlöchern wurden erwärmt durch Bestrahlung von seiten erhitzter Metallkugeln, die über die Löcher gehalten oder in sie eingesetzt wurden oder durch Berührung mit den Enden von Drahtbügeln, die durch die Löcher gesteckt und deren jenseits vorragende Teile bis auf die Ebene des Brettchens abgeschliffen waren. Es wird, ohne nähere Angaben, berichtet, daß sich, anscheinend ohne Unterschied des Verfahrens, die Wärmeempfindungskreise gleich den Druckempfindungskreisen ergeben haben. Klug ('76), der unter Kroneckers Leitung arbeitete, benutzte ein von diesem angegebenes Thermästhesiometer, bestehend aus einer Schiebelehre, deren Spitzen durch silberne Röhrchen mit Wasserspülung ersetzt waren. Die geschlossenen Enden der Röhrchen wurden auf die Haut gesetzt und ihr Abstand an der Millimeterteilung der Lehre abgelesen. Auch in diesen Versuchen fand sich die Raumschwelle für den Temperatursinn von ungefähr gleicher Größenordnung wie für den Tastsinn. Sie ergaben aber weiter eine um so kleinere Raumschwelle, je größer der Temperaturunterschied zwischen Haut und Instrument gemacht wurde.

Goldscheider ('84, '85) verband 2 in Spitzen auslaufende Messingzylinder durch ein Scharnier, erwärmte oder kühlte sie und berührte damit gleichzeitig je 2 vorher bezeichnete Wärme- oder Kältepunkte. Zur Erregung der letzteren benutzte er auch einen Zirkel, auf dessen Spitzen feine in Äther getauchte Pinsel gesteckt waren. Die wenigen von ihm mitgeteilten Zahlen sind Minimalwerte, die sich auf ausgewählte, hochempfindliche Punktpaare beziehen. Zur Aufstellung allgemeinerer Regeln sind offenbar die vorliegenden Beobachtungen noch nicht ausreichend. Derselbe ('84) hat auch das von Weber zuerst geübte Aufzeigeverfahren auf die Temperaturpunkte ausgedehnt, ist aber nicht zu abschließenden Ergebnissen gelangt.

Im Vergleich mit den Verfahrungsarten zur Prüfung des Ortssinnes im Gebiete der Tastempfindungen (s. unten) müssen die hier geschilderten Verfahrungsweisen als ziemlich unvollkommen bezeichnet werden.

Die **Erregung und Lähmung** der Temperaturempfindungsnerven **durch chemische Stoffe**, bzw. ihre Isolation durch Lähmung der übrigen Nerven der Haut ist wiederholt Gegenstand von Untersuchungen gewesen. Donaldson ('85, 413) beobachtete, daß am Auge die Schmerzempfindung durch Kokain aufgehoben werden kann, ohne Schädigung der Temperaturempfindung, eine Angabe, die v. Frey ('95, 169) nur teilweise bestätigen konnte. Goldscheider ('86 A u. B, '87 C) hat Kokain sowohl auf die Schleimhäute aufgestrichen, wie unter die Haut injiziert und eine stärkere Beeinträchtigung der Temperaturempfindung als der übrigen Empfindungsqualitäten beobachtet. Er hat ferner die erregenden, erregbarkeitssteigernden und lähmenden Wirkungen des Menthols, die lähmenden der Karbolsäure, des Chloroforms und der Kohlensäure zum Gegenstand eingehender Studien gemacht.

R. du Bois-Reymond ('93) hat Beobachtungen mitgeteilt betreffend die Wärmeempfindung, die durch verschiedene Gase CO_2, SO_2, Cl, NH_3, HCl u. a. hervorgerufen wird. Rollet ('99) prüfte die Wirkungen von Chloroform, Äther und Menthol auf eine Anzahl von Sinnesnerven und hat dabei auch die Erregung der Kältenerven berücksichtigt. Von Joteyko ('03) ist die Reihenfolge studiert worden, in der Menthol die Hautnerven lähmt. Endlich hat Alrutz ('08, 246) die Angaben der früheren Forscher über die Wirkung des Chloroforms und Menthols nachgeprüft und sie zum Teil bestätigt, zum Teil berichtigt und ergänzt. Er hat namentlich auf die Notwendigkeit hingewiesen, die thermischen Empfindungen von den sie begleitenden Schmerzempfindungen zu trennen.

Schwenkenbecher ('08) hat durch einen interessanten Selbstversuch gezeigt, daß das Menthol seinen erregbarkeitssteigernden Einfluß auf die Organe der Kaltempfindung auch vom Blut her ausübt.

Methodisch wertvoll ist die Möglichkeit, mit den vorerwähnten flüchtigen Stoffen die temperaturempfindlichen Organe an Orten zu erregen, die den anderen Reizverfahren nur sehr schwer zugänglich sind. Sehr erwünscht wäre es auch, wenn sich Substanzen nachweisen ließen, die eine lähmende Wirkung nur auf eine Gattung Sinnesnerven der Haut ausüben. Eine solche auswählende Wirkung hat sich jedoch bisher nicht mit Sicherheit feststellen lassen.

Literatur.

S. Alrutz, '97, Skand. Archiv f. Physiol. **7**, 321.
—— '00, Ebenda **10**, 340.
—— '08, Zeitschr. f. Psychol. **47**, 161.
—— —, Skand. Arch. f. Physiol. **21**, 237.
Alsberg, '63, Untersuchungen über den Raum- und Temperatursinn. Diss. Marburg; zitiert nach Thunberg '04.
L. F. Barker, '96 A, Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. 8. 348.
—— '96 B, The Journal of Experimental Med. **1**.

M. Blix, '82, Upsala läkareförenings förhandl. **18**, 87 und 427.
— '84, Zeitschr. f. Biolog. **20**, 141.
R. du Bois-Reymond, '93, Archiv f. Physiol. 187.
J. Czermak, '55, Sitzber. d. Akad. d. Wissensch. Wien, math.-naturw. Klasse **15**, 500.
M. Dessoir, '92, Archiv f. Physiol. 175.
H. H. Donaldson, '85, Mind **10**, 399.
A. Eulenburg, '66, Berl. klin. Wochenschr., Nr. 46.
'84, Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 561.
'85, Zeitschr. f. klin. Med. **9**, 174.
G. Fechner, '60, Elemente der Psychophysik. Leipzig I, 201.
M. v. Frey, '95. Berichte d. Ges. d. Wissensch. Leipzig, math.-phys. Klasse **47**, 166.
A. Goldscheider, '84, Monatshefte f. prakt. Dermatologie, 3. Bd., Nr. 7 und 8; gesammelte Abhandlungen I, Nr. 2.
Alle Anführungen aus Goldscheider geben die Seitenzahl in den gesammelten Abhandlungen an.
— '85, Archiv f. Physiol., Suppl.-Bd. Ges. Abh. I, Nr. 7.
— '86 A, Ebenda 555. Ges. Abh. I, No. 9.
— '86 B, Monatshefte f. prakt. Dermatol. **5**, Nr. 2. Ges. Abh. I, Nr. 10.
— '87 A, Archiv f. Physiol. 468. Ges. Abh. I, Nr. 12.
— '87 B, Ebenda 473. Ges. Abh. I, Nr. 13 und Archiv f. Psychiatrie **18**, 659.
— '87 C, Ebenda 575. Ges. Abh. I. Nr. 14.
— '88, Ebenda 424. Ges. Abh. I, Nr. 15.
H. Head und J. Sherren, **05**, Brain **29**.
H. Head siehe auch Rivers.
E. Hering, '77, Grundzüge einer Theorie des Temperatursinnes. Sitzber. d. Akad. d. Wissensch. Wien, 75. Bd., III. Abt.
— '79, Der Temperatursinn. Hermanns Handb. d. Physiol. **3**, II, 415.
A. Herzen, '79, Lo Sperimentale **44**, 354.
— '85, Archiv f. d. ges. Physiol. **38**, 93.
K. G. Holm, '03, Skand. Archiv f. Physiol. **14**, 242 und 249.
S. Imamura, '03, Zentralbl. f. Physiol. **17**, 233.
J. Joteyko, '03, Journ. de neurol.
J. Kesseler, '84, Untersuchungen über den Temperatursinn. Diss. Bonn.
F. Kiesow, '99, Wundts philosophische Studien **14**, 589.
F. Klug, '74, Zeitschr. f. Biol. **10**, 73.
— '76, Arb. aus d. physiol. Anstalt Leipzig **11**, 168.
Chr. Leegaard, '89, Norsk. Magazin f. Laegevidensk. **50**, Nr. 11.
— '91, Deutsches Archiv f. klin. Med. **48**, 214.
Lindemann, '57, De sensu caloris. Diss. Halsi; zitiert nach Thunberg '04.
W. A. Nagel, '95, Archiv f. d. ges. Physiol. **59**, 563.
H. Nothnagel, '67, Deutsches Archiv f. klin. Med. **2**, 284.
S. Politzer, '84, The Journal of Physiology **5**, 143.
A. Rauber, '69, Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 372.
W. H. R. Rivers und H. Head, '08. Brain **32**.
A. Rollet, '99, Archiv f. d. ges. Physiol. **74**, 383.
A. Schwenkenbecher, '08, Münchener med. Wochenschr. Nr. 28.
G. Sommer, '01, Sitzber. d. phys.-med. Gesellsch. Würzburg 63.
B. Stern, '86, Archiv f. Psychiatrie 485; zitiert nach Dessoir '92.
E. Tanzi, '86, Sulle sensazioni del freddo etc. Milano-Torino und Riv. di filosofia scient., 2. ser. **5** (zitiert nach Sherrington, Schäfers Textbook II, 963).
— '90, Rivista sperimentale di Freniatria **16**.
T. Thunberg, '94, Upsala läkaref. förh. **30**, 521.
— '01, Skand. Archiv f. Physiol. **11**, 382.
— '04, Physiologie der Druck-, Temperatur- und Schmerzempfindungen. Nagels Handb. d. Physiol. **3**, 681.
— '05, Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. **28**, 59.
E. Toulouse und N. Vaschide, '00, Compt. rend. de l'acad. d. sciences **130**. 199.

K. Vierordt, '71, Grundriß der Physiologie des Menschen, 4. Aufl., Tübingen, S. 302.
M. v. Vintschgau und E. Steinach, '87, Archiv f. d. ges. Physiol. **41**, 367.
— '88, Ebenda, **43**, 152.
E. H. Weber, '46, Der Tastsinn und das Gemeingefühl in R. Wagners Handwörterbuch der Physiologie, 3. Bd., 2. Abt., Braunschweig, Vieweg
— '51. Derselbe Artikel in besonderem Abdruck, gleicher Verlag.
Die Seitenzahlen zu Webers Untersuchungen beziehen sich alle auf diese Sonderausgabe.

II. Druckempfindungen.

Die Versuche, welche eine Beeinflussung der Druckempfindungen durch die Temperatur des Reizmittels zu beweisen scheinen (E. H. Weber '51, 44; Szabadföldi '65), können heutzutage nicht mehr als Stützen für die Annahme gelten, daß Druck- und Temperaturempfindungen durch denselben nervösen Apparat vermittelt werden. Sie gehören ebenso wie die Verwechslungserscheinungen (Fiek & Wunderli '60) in das Gebiet der Sinnestäusehungen.

Die folgende Darstellung geht von der Voraussetzung aus, daß es dieselben nervösen Gebilde sind, welche die flüchtige Empfindung der Berührung wie die relativ andauernde des Druckes und Zuges hervorrufen. Diese Gebilde finden sich in der Haut und sind nur insofern verschieden, als die behaarten Hautflächen zur Berührungsempfindung, die unbehaarten zur Druckempfindung besonders befähigt erscheinen (von Frey '96 216—217). Die Auffassung, daß die Berührungsempfindung den Gemeingefühlen zuzuteilen sei (Bastelberger '79) ist aus vielen Gründen (z. B. der scharfen Lokalisation) abzulehnen. Aber auch die Aufteilung des Tastsinns in einen Berührungs- und einen Drueksinn, wie sie von Vaschide & Rousseau ('02) sowie von Trotter & Davies ('09, 157) befürwortet wird, ist nicht gerechtfertigt. Die ausführliehe Begründung dieses Standpunktes muß indessen an anderer Stelle erfolgen.

E. H. Weber ('51, 42) hat erörtert, daß die Haut Empfindungen besonderer Art vermittelt, wenn sie zusammengedrückt oder ausgedehnt wird, kurz ihre Spannung ändert; ferner, daß in die Tastvorstellungen sowohl diese Druck- (und Temperatur-) Empfindungen von seiten der Haut, wie auch Empfindungen von den Bewegungsorganen eingehen. Die näheren Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit die druckempfindlichen Organe der Haut in Erregung geraten, hat er nicht untersucht, sich vielmehr vorwiegend mit dem intensiven und örtlichen Unterseheidungsvermögen befaßt. Über die Messungsverfahren, die er hierzu ausbildete, s. unten. Er beschreibt nur einen Versuch (90), der als eine Vergleichung der Empfindlichkeit zweier Hautstellen gelten kann. Er legte 4 Unzen auf die Volarseite der mittleren Finger und 5 auf den Unterarm; die beiden Gewichte wurden gleich geschätzt und er schließt daraus, daß die Empfindlichkeit des Unterarms geringer ist. Berücksichtigt man, daß die unebenen Finger dem offenbar umfänglichen Gewicht eine kleinere Unterstützungsfläche bieten müssen, als der Unterarm, so erseheint der Schluß nicht gerechtfertigt. Aubert & Kammler ('58) suchten

die kleinsten Gewichte zu bestimmen, die auf 9 mm² Haut aufgesetzt noch empfunden werden. Sie benutzten der schlechten Wärmeleitung wegen Scheiben aus Kork oder Hollundermark von der genannten Größe und beschwerten sie bis zu dem erforderlichen Grade. Mit Hilfe von Kokonfäden wurden die kleinen Gewichte langsam auf die Haut herabgelassen. Die Untersucher wurden gewahr, daß bei dieser Versuchsanordnung die behaarten Hautflächen gegenüber den unbehaarten begünstigt sind. Durch Rasieren der Haare wurde die Schwelle auf ersteren um das mehrfache erhöht. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes waren die Unterschiede in der Empfindlichkeit zwischen den verschiedenen Hautflächen, wenn nicht besonders verdickte Epidermis vorlag, gering und jedenfalls nicht von derselben Größenordnung, wie sie für den Ortsinn von Weber gefunden worden waren. Der Schwellendruck betrug in hydrostatischem Maß etwa $^1/_{1000}$ Atmosphäre. Dem gegenüber fand Meißner ('59) hundermal größere Drücke unwirksam, wenn sie durch Untertauchen der Haut unter Quecksilber erzeugt wurden. Bloch ('91) hat die kleinsten Kräfte zu messen gesucht, welche bei Zug und Druck eine Empfindung hervorrufen. Zu den Zugversuchen klebte er ein quadratisches Stück Heftpflaster von 64 mm² Fläche auf die Haut und zog an demselben mittels eines Fadens, in den eine feine geeichte Spiralfeder eingeschaltet war. Die Größe der wirksamen Spannung wurde an einer Teilung abgelesen. Die Größe der Fläche hält er für unwichtig. Die kleinsten Schwellen verhalten sich zu den größten wie 1:400. Zu den Druckversuchen verwendete er an einem Griff befestigte Borsten oder Haare, an deren freies Ende ein quadratisches Stück Papier von 4—9 mm² Fläche geklebt war, die Papierfläche der Borste parallel. Wird das Papierstückchen auf die Haut gelegt, so ist die Borste tangential gerichtet zu der konvex gedachten Körperstelle. Durch Biegen der Borste wird das Papier gegen die Haut gedrückt mit einer Kraft, die an einer Teilung abgelesen und vorher ausgemittelt werden kann. Die außerordentlich niederen Minimalwerte ($^1/_{68}$ mg für die Ohrmuschel) und die Steigerung auf das 8000fache für die unempfindlichsten Stellen (Haut der Arme und Beine, rasiert) lassen den Wert des Verfahrens zweifelhaft erscheinen (man vergl. hierzu v. Frey '96, 216). Griffing ('95, 17) hat das Verfahren insofern verbessert, als er auf die zu prüfende Hautstelle ein Kartonscheibchen von „0,9 cm Fläche“(?) auflegte und es dort dauernd liegen ließ. Die Einwirkung geschah mit einer Vorrichtung ähnlich der von Bloch, doch war an das Ende der Borste nicht ein Papierstück, sondern eine zweite Borste, in rechtem Winkel zur ersten, geklebt (Fig. 7). Verfasser bekam so wechselnde Werte, daß er die Existenz einer Schwelle im Sinne einer physiologischen Konstante leugnet.

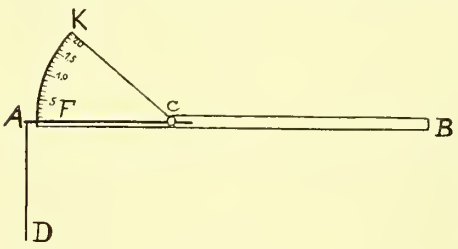


Fig. 7.

Borstendynamometer zur Bestimmung der Empfindlichkeit des Drucksinns (Griffing).

Die Schwierigkeit, starre Körper von einiger Ausdehnung der Haut genügend anzuschmiegen, und die Störung, welche den Messungen durch die

Anwesenheit der Haare droht, lassen sich nur durch sehr kleinflächige Reize genügend überwinden. Auch bei der klinischen Untersuchung des Drucksinnes kann die Behaarung Schwierigkeiten bereiten (man vergl. hierzu Rivers & Head '08, 25).

Kleinflächige Reize hat Blix ('85, 149) zuerst angewendet in der Absicht, die Spezifität der für Druck empfindlichen Nervenenden nachzuweisen. Er benutzte einen sehr leichten Hebel (Strohhalm h der Figur 8), der an seinem freien Ende ein nach unten gerichtetes Stück Pferdehaar trug. Wurde der Hebel freigegeben, so fiel er gegen die unterliegende Hautstelle herab, wobei das Haar dem zu reizenden Punkt einen Stoß erteilte. Die Kraft dieses Stoßes war veränderlich mit der Fallhöhe und mit dem Drehungsmoment der Schwere an dem Gegengewicht m des Hebels, das in einer mit der Achse zusammenfallenden Horizontalebene entlang einer Kreisteilung g drehbar war. Mit Hilfe dieses gut abstufbaren Reizungsverfahrens gelang es Blix, nicht nur das Vorhandensein besonderer, von den Temperaturpunkten verschiedenen Druckpunkten, sondern auch ihre örtliche Beziehung zu den Haarbälgen nachzuweisen. Blix versuchte auch die unipolare faradische Reizung der Punkte, kam aber hierbei nicht zu so eindeutigen Ergebnissen ('84 145, '85 154).

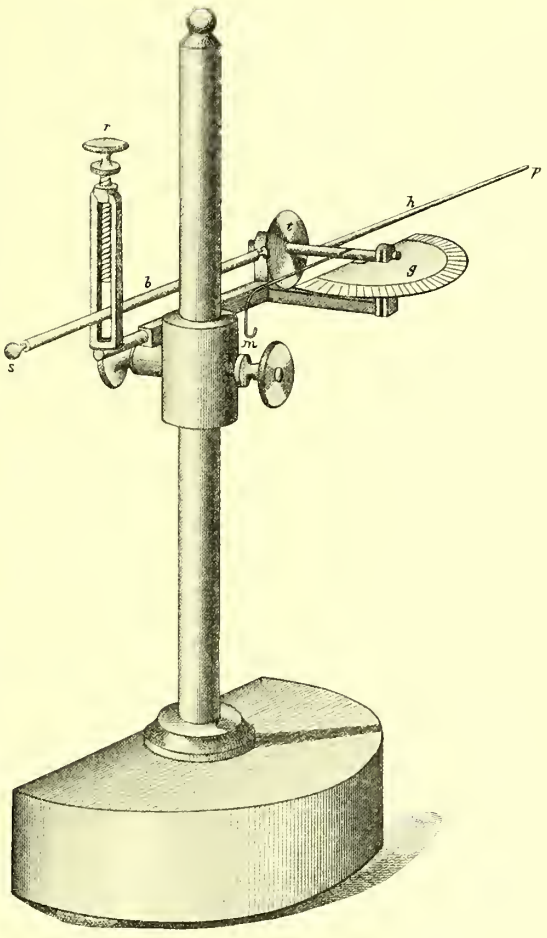


Fig. 8.
Fallhebel zur kleinflächigen mechanischen Reizung der Haut (Blix).

Gegenüber der Vorrichtung von Blix bedeuten die von Goldscheider benutzten Hilfsmittel ('84; '85 I, 77 und 188), spitze und stumpfe Nadeln, zugespitzte Hölzchen und Korkstücke, Federfahnen, einen Rückschritt, weil sie die Einhaltung einer gleichmäßigen Reizstärke und eine meßbare Abstufung derselben nicht gestatten. Die der Wirklichkeit nicht entsprechenden Angaben Goldscheiders über Dichte und Verteilung der Druckpunkte finden darin ihre Erklärung. Handlicher als der Apparat von Blix und doch einer Eichung nach ihrem Wirkungsgrade zugänglich sind die Reizhaare

v. Freys ('94; '96, 208). Sie bestehen (vergl. Fig. 9) aus einem Holzstäbchen als Handgriff und einem recht- oder stumpfwinklig hierzu befestigten Haare. Wird das Haar auf die zu untersuchende Haut, senkrecht zu deren Oberfläche, aufgestoßen, so kann die Einwirkung über einen gewissen Höchstwert nicht hinausgehen. Diese als Kraft des Haares bezeichnete maximale Wirkungsweise kann auf der Wage bestimmt werden. v. Frey hat außerdem den Querschnitt seiner Reizhaare bestimmt und durch Division in die Kraft Reizwerte erhalten, welche die Dimension eines hydrostatischen Drucks besitzen. Nagel ('95) hat diese Auswertung beanstandet und vorwiegend auf Grund anatomischer Überlegungen die Kraft des Haares als die für die Reizwirkung an einem einheitlichen Sinnesapparat allein maßgebende Dimension angesprochen; auch Trotter & Davies ('09, 161) haben sich neuerdings dieser Meinung angeschlossen. Die experimentelle Prüfung

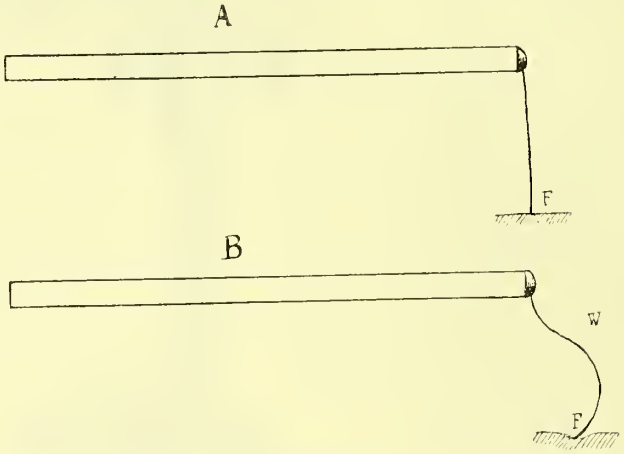


Fig. 9.

Reizhaare nach v. Frey, A auf die Haut aufgesetzt, B bis zur maximalen Kraftentwicklung durchgebogen.

hat indessen ergeben, daß auf denjenigen Hautflächen, auf welchen die Druckpunkte verstreut genug liegen, um eine isolierte Erregung zu gestatten, weder die Kraft noch der (hydrostatische) Druck des Haares eine eindeutige Maßeinheit liefern können, wohl aber das Verhältnis der Kraft zum Halbmesser der wirkenden Fläche, d. h. eine Größe von der Dimension einer Oberflächenspannung. v. Frey empfiehlt daher ('96, 228), die Reizhaare sowohl nach Druckwerten (für andere Bestimmungen erforderlich, s. unten) als nach Spannungswerten zu eichen. Ist die Beschränkung der Erregung auf einzelne Druckpunkte nicht möglich (wie auf dem Lippenrot oder den Fingerbeeren), so wächst mit der Fläche die Zahl der getroffenen Nervenenden und damit die physiologische Wirkung. Die Bestimmung von Druck- und Spannungswerten läßt sich sparen, wenn man allen Reizhaaren den gleichen Querschnitt gibt.

Da jedes Reizhaar nur einen einzigen Reizwert besitzt, ist zu Versuchszweeken die Anfertigung eines Satzes derselben erforderlich. Für sehr viele

Versuche im Gebiete des Drucksinns kann man mit einem Satze von 5 Haaren mit den Spannungswerten 1, 2, 4, 8 u. 16 g/mm auskommen. Zu klinischen Zwecken haben Rivers & Head ('08, 26) einen Satz von 6 Haaren (1, 2, 3, 4, 5, 8 g/mm) ausreichend gefunden. Statt eines Satzes von Reizhaaren läßt sich auch ein einziges Haar (oder eine Borste) verwenden, welches mittels eines daran befestigten Drahtes, verschieden weit aus einer Hülse hervorgeschoben werden kann (vergl. Fig. 10) (von Frey '96, 214, Stransky '99, '00). Diese Anordnung hat aber 2 Nachteile. Für schwache Reize muß das (nicht zu dünne!) Haar soweit vorgeschoben werden, daß es zu zitternden Bewegungen neigt und dann nicht mehr sicher auf den gewünschten Punkt aufgestoßen werden kann; und ferner bedarf es einer sehr sorgfältigen Behandlung, wenn vermieden werden soll, daß das Haar im Gebrauch oder beim Überschieben der Schutzhülse eine Abknickung erleidet. Hierdurch würde die Eichung des Haares illusorisch werden.

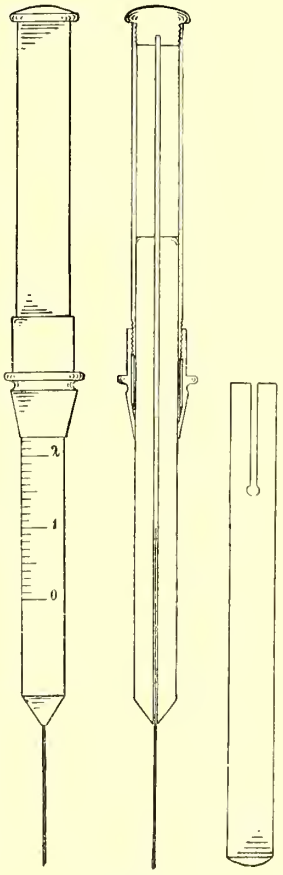


Fig. 10.
Haarästhesiometer (v. Frey).

Statt der Haare oder Borsten können auch mit Vorteil feine Glasfäden oder Lamettadrähte verwendet werden (Hensen '93, Thunberg '95, Alrutz '05). Ein anderes Meßprinzip für kleinflächige Reize ist von Toulouse & Vaschide ('00) eingeführt worden. Es besteht in dem Aufsetzen von Nadeln, welche die Haut nur mit ihrem Eigengewicht belasten.

Der Einfluß der Geschwindigkeit der Deformation auf die Reizwirkung ist mit Hilfe von Schwellenreizen durch von Frey ('96, 188) untersucht worden, der sich hierzu der sogenannten Schwellenwage bediente (vergl. Fig. 11). Dieselbe besteht aus zwei einarmigen Hebeln, die sich um zwei horizontale übereinander gelegene Achsen drehen. Die beiden Achsen sind durch ein Stück Uhrfeder miteinander verkuppelt, so daß sie sich nicht unabhängig bewegen können. Wird der obere Hebel gedreht, so drückt der untere Hebel auf die von ihm berührte Hautstelle mit einer Kraft, die durch die Deformation der Uhrfeder bestimmt ist und empirisch ermittelt wird. Die Bewegung des oberen Hebels geschieht durch die Trommel eines Uhrwerkes, die den oberen Hebel bezw. einen an ihn geknüpften Faden eine gewisse, beliebig einstellbare, Strecke weit mit nimmt und ihn dann in der neuen Stellung stehen läßt. Die Rückführung in die Ausgangslage geschieht mit der Hand. Mit der Umdrehungsgeschwindigkeit des Uhrwerkes ändert sich auch die Geschwindigkeit der Deformation, ist aber, wie besondere Versuche lehrten, für jede Einstellung eine sehr annähernd gleichförmige. Um die Lage und Größe der zu deformierenden Hautstelle sicher im voraus be-

stimmen zu können, lag der untere Hebel nicht unmittelbar auf der Haut, sondern berührte mit seinem Stift eine Scheibe von Karton oder Kork von 3,5—21 mm² Fläche. Die Versuche wurden an unbehaarten Stellen (Daumenballen, Handgelenk) ausgeführt, der Arm in einer Gipsform gelagert. Das methodisch wesentlichste Ergebnis der Versuche ist, daß bei einer relativ geringen Belastungsgeschwindigkeit von ungefähr 5 g pro Sekunde schon die maximale Wirkung nahezu erreicht wird. Daraus folgt, daß bei dem Aufstoßen der Reizhaare auf die Haut diese wirksamste Belastungsgeschwindigkeit in

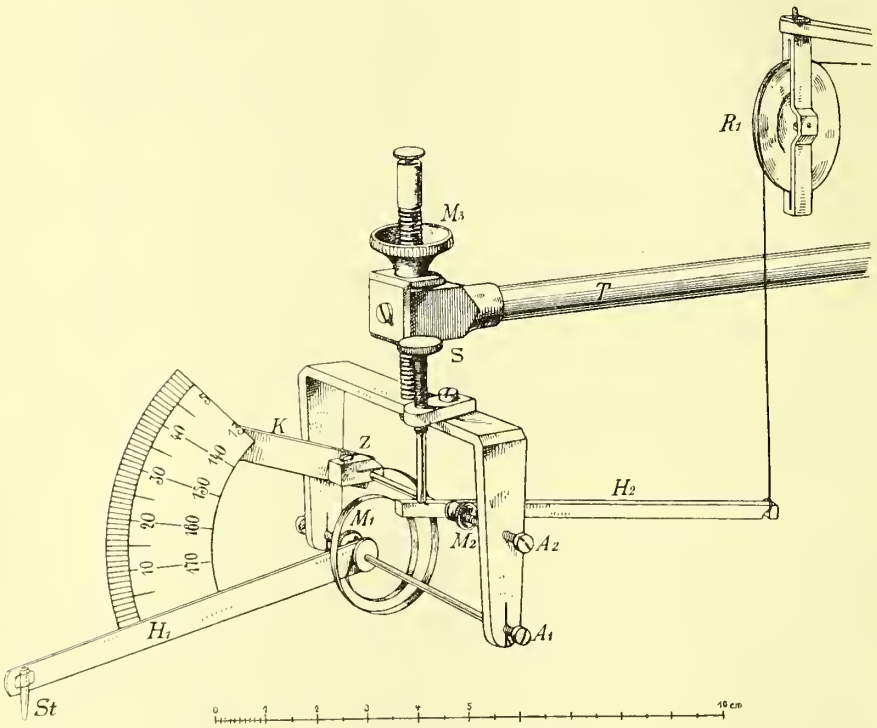


Fig. 11.

Schwellenwage nach v. Frey.

der Regel leicht erreicht oder überschritten werden kann, so daß sich der Reiz auch in dieser Beziehung als ein merklich konstanter herausstellt.

Den Einfluß der Flächengröße bei konstanter Belastungs- bzw. Druckgeschwindigkeit haben v. Frey ('96, 201) sowie v. Frey und Kiesow ('99) untersucht. Auch hierzu diente die oben beschriebene Schwellenwage. Die erstgenannten Versuche beziehen sich auf Flächen von 3,5—21 mm², die letzteren auf solche von 0,48—1,77 mm². In den letzteren Versuchen war ferner dafür Sorge getragen, daß stets nur ein einziger Druckpunkt gereizt wurde, indem möglichst isoliert liegende, besonders empfindliche Punkte gewählt und diese mit einem Scheibchen aus dünnem Kupferblech bedeckt wurden.

Die an dem unteren Hebel der Schwellenwage befestigte Nadel wurde mit ihrer Spitze auf den Mittelpunkt des Scheibchens eingestellt. Um rasche Druckschwankungen über größere Flächen (Haut eines Fingers) zu erhalten, wurde in Anlehnung an den Versuch von Meißner ('59) ein Glasrohr, in das der Finger eingeführt war, mit Quecksilber gefüllt und abwechselnd vertikal und horizontal gerichtet. Das Ergebnis der Versuche, das zu einer Theorie der Wirkungsweise mechanischer Reize führte, kann hier nicht näher erörtert werden.

Der Frage der Wirkungsweise deformierender Reize dienten ferner Versuche, über die v. Frey ('97) und Clark ('98) berichtet haben. Leichte Scheiben von 0,3—0,5 und andererseits große bis zu 50 mm² wurden auf der Haut festgeklebt und durch Vermittlung eines doppelarmigen Hebels mit gleichen Kräften entweder auf Druck oder Zug beansprucht. Die Reize wurden teils als momentane oder Schlagreize, teils als andauernde gegeben.

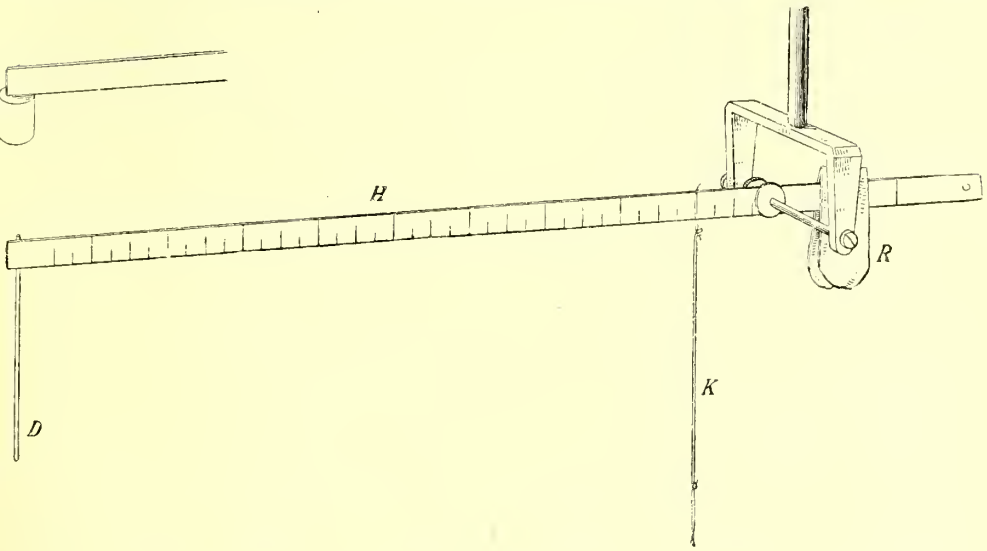


Fig. 12.
Hebel zur Ausübung von Druckreizen wechselnder Kraft und Fläche (v. Frey).

Die kleinflächigen Reize wirkten das eine Mal auf isoliert liegende leicht ansprechende Druckpunkte, das andere Mal auf Hautstellen, die frei von Druckpunkten waren. Endlich wurde die Erregbarkeit einzelner Druckpunkte durch längere Belastung herabgemindert und hierauf der Erfolg auf momentane Druck- und Zugreize geprüft.

Über die Wahrnehmung andauernder Belastungen hat v. Frey ('96, 177) Beobachtungen mitgeteilt, wobei er sich ebenfalls eines Hebels von geringer Trägheit (Fig. 12) bediente. Außer der Größe des Gewichts und der belasteten Fläche wurde auch der Ort und die Dauer der Einwirkung verändert. Es hängt von den Versuchsbedingungen ab, ob die Empfindung den Reiz (die Belastung) überdauert, oder früher als dieser erlischt.

Die Frage der Nachdauer von Reizen kurzer Einwirkungszeit hat man, in Analogie mit den Erscheinungen am Farbenkreisel, aus der Verschmelzungsfrequenz bei intermittierender Reizung zu erschließen gesucht. Die Ergebnisse sind sehr verschieden ausgefallen. v. Wittich ('69), der einen Versuch Valentins wiederholte und variierte, erhielt u. a. auf der Fingerkuppe eine Verschmelzung erst bei nahe 4000 Reizen in der Sekunde (S. 338). Lalanne ('76) fand periodische Berührung einer Hautstelle mit Federbart, Pinsel oder Kautschukrand bei 13—22 Wiederholungen in der Sekunde in die Empfindung kontinuierlicher Berührung zusammenfließend. Bloch ('80) ließ eine elektrisch betriebene Stimmgabel gegen die Haut schlagen und beobachtete, daß an den meisten Hautstellen 52—64 Stöße nicht mehr getrennt empfunden werden, auf der Volarseite der Finger war dagegen bei 70 Stößen die Verschmelzungsgrenze noch nicht erreicht. Sergi ('92) macht zuerst auf die Bedeutung der Amplitude aufmerksam und findet, daß am Finger unter günstigen Bedingungen noch 1000 Schwingungen, 400—500 an vielen anderen Stellen, 50 überall unterschieden werden können. Bei Reizung der Haut mit sehr schwachen Wechselströmen beobachtete Grandis ('20), daß die anfänglich diskontinuierliche Empfindung nach einiger Zeit in eine andauernde Berührungsempfindung überging. Hierher gehört auch das Gefühl der Rauhigkeit beim Überfahren mit dem Finger von Stäben, die mit Draht verschiedener Feinheit übersponnen sind. Letzteres Verfahren, das freilich auch als Messung einer Unterschiedsschwelle betrachtet werden kann, hat klinische Verwertung gefunden (Rumpf '84, '89; Treitel '05). Eine Messung von intensiven und räumlichen Unterschiedsschwellen liegt sicher vor bei dem von J. J. Graham Brown ('02) ausgebildeten Verfahren (Fig. 13), wobei eine Oberfläche von meßbar veränderlicher Rauhigkeit über die Haut geführt wird.

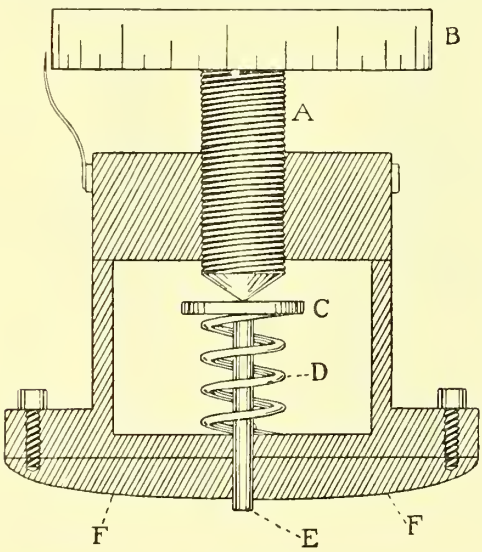


Fig. 13.
Ästhesiometer von Graham Brown zur Prüfung der Rauhigkeitsempfindung.

Versuche zur Aufstellung einer Topographie der druckempfindlichen Organe in bezug auf ihre Dichte und Erregungsschwelle sind mit Hilfe kleinflächiger Reize ausgeführt worden von Blix ('85), Goldscheider (mit unzulänglichen Mitteln '85), v. Frey ('96), Kiesow und Fontana ('01), Kiesow ('02, '04B), Alrutz '05 u. a.

Über den zeitlichen Anstieg der Druckempfindung berichtet Arps ('09). Er gibt hintereinander auf die ersten Phalangen zweier benachbarter Finger je einen Reiz. Der eine derselben, der „Normalreiz", ist

seiner Stärke nach konstant (134,2 bzw. 58,5 g), seiner Dauer nach aber wechselnd zwischen 13 und 1385 σ; mit ihm wird der andere, der „Vergleichsreiz", verglichen, der von konstanter Dauer ($^1/_2$—1 Sek.), aber wechselnder Stärke ist. Der Normalreiz wird durch einen Elektromagneten erteilt (Fig. 14 A und B), die Dauer des Stromschlusses durch das Kontaktpendel von Wundt bestimmt. Den Vergleichsreiz liefert eine Strattonsche Druckwage (**96**) mit pneumatischer Auslösung. In der Darstellung der Ergebnisse fehlt eine Erörterung darüber, inwieweit sie durch die mechanischen Eigenschaften des reizgebenden Apparates bedingt sind. Es ist namentlich zu vermuten, daß das vorläufige relative Maximum, das in allen Versuchen bei 380 σ gefunden wurde, durch eine Schwingung des ziemlich trägen Reizhebels veranlaßt sei.

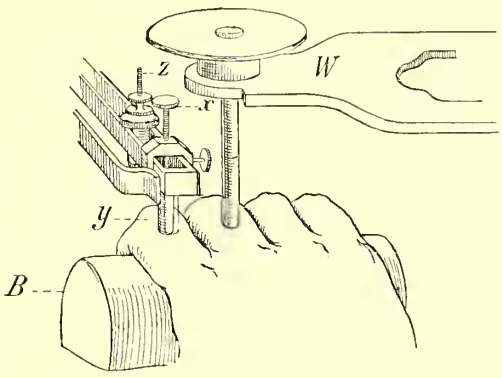


Fig. 14 A.
Versuchsanordnung von Arps zur Untersuchung des zeitlichen Anstiegs der Druckempfindung. Der Normalreiz links (2. Finger), der Vergleichsreiz rechts (3. Finger).

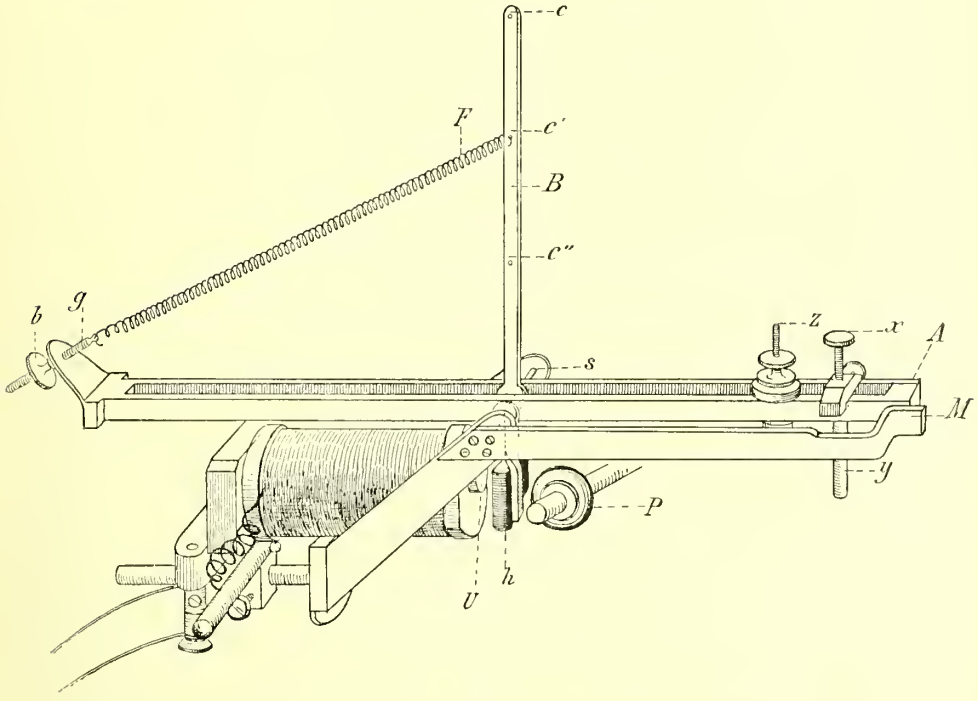


Fig. 14 B.
Einrichtung für den Normalreiz nach Arps: Konstante Stärke aber wechselnde Dauer.

Die Reaktionszeit der Druckempfindung ist durch von Wittich ('69) zuerst gemessen worden, der sie länger fand als die Reaktion auf elektrischen nicht schmerzhaften Hautreiz. Zur mechanischen Reizgebung verwandte v. Wittich den Tetanomotor Heidenhains in etwas veränderter Gestalt. Das Verfahren läßt den Einwand zu, daß die verspätete Reaktion wenigstens zum Teil durch die Trägheit der reizenden Vorrichtung bedingt ist. Einwandfreier ist in dieser Richtung das Verfahren Kiesows ('04 A), der die Reizvorrichtung (Reizhaar oder Holzstäbchen zur Erregung ausgewählter Druckpunkte) zwar auch durch einen Elektromagneten bewegen ließ, mit ihr aber starr verband einen Quecksilberkontakt, der in dem Moment geschlossen wurde, in welchem die Berührung der Haut stattfand. v. Vintschgau und Steinach ('88) haben ihr oben bereits erwähntes Thermophor nicht nur zur Reaktionsmessung für Temperaturreize, sondern auch für Druckreize verwertet.

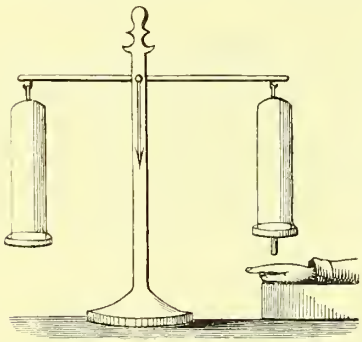


Fig. 15.
Wage zur Erzeugung von Druckreizen (Dohrn).

Die **Unterschiedsempfindlichkeit** oder die Feinheit des Drucksinns ist zuerst von E. H. Weber geprüft worden ('51, 85) durch wechselweises Auflegen verschiedener Gewichte von gleich großer Oberfläche auf dieselbe Hautstelle. Er fand dieses Verfahren für den Zweck vorteilhafter, als die gleichzeitige Belastung zweier symmetrischer Hautstellen mit den zu vergleichenden Gewichten. Zwischen dem Auflegen des ersten und zweiten Gewichtes darf ohne Schaden für die Schärfe der Vergleichung um so mehr Zeit (in Sekunden) verstreichen, je größer die Gewichte sind. Die Versuche führten zur Aufstellung des nach Weber benannten Gesetzes, das sich von allgemeiner Bedeutung für die Größenvergleichung auf psychophysischem Gebiete erwiesen hat.

Dohrn ('61) verbesserte das Verfahren, indem er zur Reizgebung eine Wage (Fig. 15) benutzte, deren eine Schale einen nach unten vorragenden Stift trug, der die Haut berührte. Dieses seitdem oft wieder verwendete Prinzip gewährt den Vorteil, daß die einwirkenden Gewichte eine Führung erhalten und Belastung, namentlich aber Entlastung in viel reinerer, durch Berührungen nicht gestörter Weise ausführbar sind. In einer Nachprüfung, die Bastelberger ('79) ausführte, wobei er den Metallstift Dohrns zweckmäßig durch eine thermisch indifferente Korkpelotte ersetzte, fand er die Methode sehr zuverlässig, aber nicht besonders bequem. Er suchte daher ein von Goltz ('63) zuerst angegebenes Verfahren auszubilden, das auf der Erkennbarkeit von Schlauchwellen durch die zu prüfende Hautstelle beruhte. Ein mit Wasser unter bestimmtem Druck gefüllter Kautschuckschlauch wird an dem einen Ende zusammengedrückt durch das auf der Schale einer Tafelwage niedergehende Gewicht; die erzeugte Welle dehnt an dem anderen Ende des Schlauches einen Kautschukfinger, der die zu prüfende Hautstelle berührt. Neben der Schwierigkeit gleichmäßiger Anlegung hat das Verfahren

den Nachteil, daß mit der Amplitude der Schlauchwelle auch der Umfang der deformierten Hautstelle sich ändert. Bastelberger hat auch das von Eulenburg ('69) zur Messung von Unterschiedsschwellen angegebene Barästhesiometer geprüft und in seinen Angaben nicht zuverlässig befunden. Für die Untersuchung der Schmerzempfindlichkeit der Haut, wobei stärkere Drucke zulässig sind, haben übrigens analog gebaute Instrumente (Spiralfederdynamometer) ihre Berechtigung (s. unten).

Der Einfluß der Geschwindigkeit der Druckänderung auf die Unterschiedsschwelle ist zuerst von Hall und Motora ('87) untersucht worden. Auf dem sehr schweren Balken einer Wage bewegte sich ein Laufgewicht, das durch ein Uhrwerk mit gleichmäßiger Geschwindigkeit

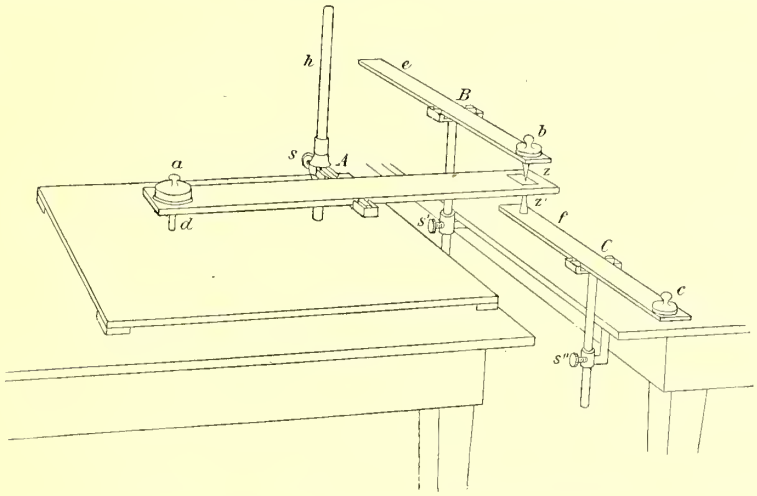


Fig. 16.
Strattons Druckwage. Der Stift d ruht auf der Hautstelle die geprüft werden soll. Entfernung von b vergrößert, von c vermindert die Wirkung des Gewichtes a.

im Sinne einer Zunahme oder Abnahme der Belastung abgerollt werden konnte. Eine Unzweckmäßigkeit des Versuchsplanes bestand darin, daß nicht die Merklichkeit oder Unmerklichkeit einer bestimmten Belastungsänderung (bei gegebener Änderungsgeschwindigkeit) untersucht, sondern die Belastungsänderung bis zur Erkennbarkeit fortgesetzt wurde, so daß eine Verquickung von Schwellenbestimmung und Reaktionsmessung gegeben ist. Die Versuchsmethode ist nicht eingehend genug dargestellt, um in eine Erörterung der möglichen Fehlerquellen einzutreten, durch welche die zum Teil auffallenden Ergebnisse bedingt sein mögen. Der von R. Funke ('91) gemachte Vorschlag, die Empfindung der Klebrigkeit mit Wasser verschieden stark verdünnten Glyzerins zur Beurteilung der Unterschiedsempfindlichkeit zu benutzen, hat keine Verwertung gefunden. In einer methodisch und kritisch vorzüglich durchgeführten Arbeit hat Stratton ('96) die Wahrnehmung von Belastungsänderungen wechselnder Geschwindigkeit untersucht. Zu plötzlichen Belastungsänderungen benutzte er 3 äquilibrierte Hebel (Fig. 16), von denen 2 auf den dritten (den Reizhebel) so einwirkten, daß das Normal-

gewicht des letzteren durch gleichartige Handgriffe (Abheben eines Gewichtes) um denselben beliebig wählbaren Teilbetrag vermehrt oder vermindert werden konnte. Bei den Belastungsänderungen von abstufbarer Geschwindigkeit gesehah die Abhebung des Gewichtes durch einen Schwimmkörper (Fig. 17, K), der mit dem Spiegel des ihn tragenden Wassers stetig herabsank, sobald der Auslaß geöffnet wurde. Durch die eigentümlich gestaltete Form des Wassergefäßes war dafür gesorgt, daß das Sinken des Wasserspiegels proportional der Zeit erfolgte. Der fein einstellbare Hahn H gestattete die Wahl verschiedener Geschwindigkeiten. Die Abhandlung,

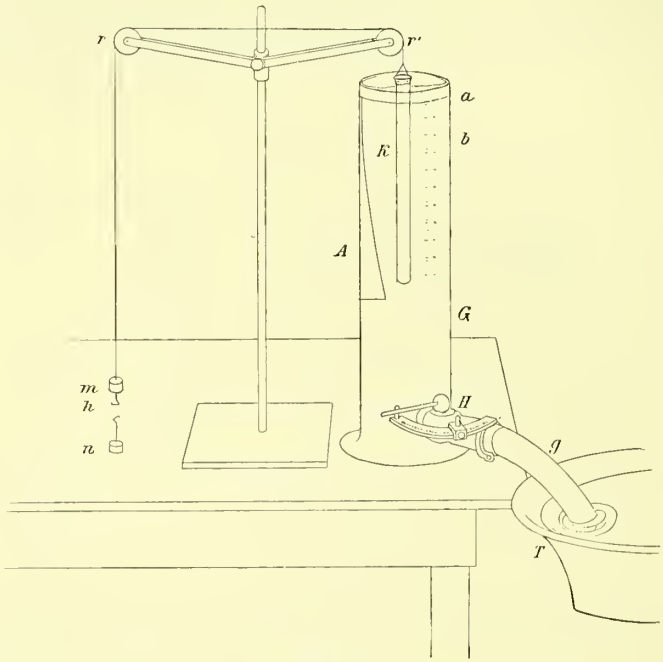


Fig. 17.
Strattons Einrichtung zur Abhebung der Gewichte mit gleichmäßiger und wählbarer Geschwindigkeit.

die sich durch übersichtliche Darstellung der Ergebnisse auszeichnet, enthält außerdem einen interessanten Versuch, das Urteil durch die Versuchsperson graphisch registrieren zu lassen, und eine eingehende Kritik der Untersuchung von Hall und Motora. Auch Seashore (**96**) hat für Belastungsänderungen mit abstufbarer Geschwindigkeit die oben bereits bemängelte Vermengung von Schwellen- und Zeitmessung benutzt, für plötzliche Änderungen aber reine Schwellenmessungen ohne Rücksicht auf die Wahrnehmungszeit. Die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen sind also gar nicht direkt vergleichbar. Trotzdem versucht der Verfasser, sie ohne weiteres miteinander in Beziehung zu setzen. Die gebrauchten, nur beschriebenen, nicht abgebildeten, experimentellen Hilfsmittel scheinen denen Strattons ähnlich zu sein.

Von Stratton ('96, 542) ist auch der Versuch gemacht worden, die mit der Zunahme der Belastung stets einhergehende räumliche Ausbreitung der Deformation auf der Haut auszuschließen oder doch zu vermindern, um den Einfluß der letzteren auf das Ergebnis der Schwellenbestimmungen beurteilen zu können. Die Belastungsänderung auf einen oder einige isolierte Druckpunkte zu beschränken, wodurch die Unterschiedsschwelle noch reiner zur Darstellung kommen würde, ist bisher nicht versucht worden.

Zur Messung der **„Feinheit des Ortssinnes"** der Haut hat sich E. H. Weber ('51, 59) eines Zirkels bedient, dessen beide abgeschliffene Spitzen er gleichzeitig auf die Haut setzte. Ist der Abstand genügend klein, so werden die beiden Berührungen nur als eine empfunden. Der reziproke Wert des Abstandes, bei dem die Empfindung einer doppelten Berührung auftritt, ist das Maß für die Feinheit des örtlichen Unterscheidungsvermögens. Man bezeichnet die fragliche Länge gegenwärtig als die simultane Raumschwelle oder kurz Simultanschwelle des Drucksinnes an der geprüften Körperstelle. Auf diese Weise hat E. H. Weber die Simultanschwelle für eine große Zahl von Körperstellen bestimmt. Das Verfahren ist von Physiologen, Pathologen, Psychologen und Pädagogen vielfach angewendet worden und ist bis auf den heutigen Tag ein unentbehrliches Hilfsmittel der nervenärztlichen Untersuchung (Head und Thompson '06). Die späteren Untersucher haben den Zirkel Webers entweder unverändert übernommen, eventuell die metallenen Enden gegen Bein, Holz oder Kork vertauscht oder sie haben wie Sieveking ('58), Brown-Séquard ('58), Eulenburg ('65), Klug ('77) ihn durch einen Stangenzirkel ersetzt. Auch sind Kombinationen von Stangenzirkel und Spiralfeder-Ästhesiometer angegeben worden (Kowalewsky '76, Griesbach '97, Michotte '05, 38). Alle diese Abänderungen geben indessen kaum bessere Gewähr für das gleichzeitige und gleichstarke Aufsetzen der Spitzen, worauf bei der Schwellenbestimmung in erster Linie zu achten ist.

Gelenkzirkel wie Stangenzirkel erlauben eine stetige Änderung des Spitzenabstandes und demgemäß die Untersuchung nach der Methode der Minimaländerungen, welche in dem vorliegenden Falle darin besteht, daß man unter Vergrößerung des Abstandes das Auftreten der Doppelempfindung sowie unter Verkleinerung des Abstandes das Verschwinden derselben beobachtet und aus den beiden, in zahlreichen Wiederholungen bestimmten Grenzwerten das Mittel zieht (man vgl. hierzu Wundt '02, I, 476).

Im Gegensatz hierzu benutzten Vierordts Schüler feste Abstände, die von Linie zu Linie (1 Pariser Linie = $2^1/_4$ mm) fortschritten und die sie sich dadurch herstellten, daß sie in Holzleisten je 2 Nadeln in den gewünschten Abständen befestigten. Die Köpfe der Nadeln wurden auf die Haut gesetzt (Kottenkamp und Ulrich '70, Paulus '71, Riecker '73, '74, Hartmann '75, Camerer '81). An einer Körperstelle wurden 10—12 Spitzenabstände in regelloser Folge und untermischt mit Vexierversuchen (d. h. mit Aufsetzen nur eines Nadelkopfes) geprüft. Camerer beschränkte sich auf 4—6 Spitzenabstände, prüfte aber jeden derselben an der gleichen Hautstelle 8 mal hintereinander und mischte ohne bestimmte Ordnung 4 einfache Reizungen (Vexierversuche) dazwischen. Zu jedem Spitzenabstand erhält man dann einen gewissen Prozentsatz richtiger Urteile, der für die betreffende

Hautstelle charakteristisch ist und für eine andere Hautstelle einen anderen Wert besitzt. Das räumliche Unterscheidungsvermögen zweier verglichener Hautstellen ist gleichzusetzen den reziproken Werten jener Spitzenabstände, welche den gleichen Prozentsatz richtiger Urteile liefern. Da die versuchsmäßige Ermittlung soleher äquivalenten Spitzenabstände zu einer unübersehbaren Häufung der Einzelbestimmung führen würde und höchstens zufällig den richtigen Abstand treffen ließe, ist eine Ableitung aus den Versuchsergebnissen durch graphische Interpolation oder Rechnung erforderlich. Vierordt ('77, 317) hat sich des ersten Verfahrens bedient, während Fechner unter entsprechender Umgestaltung seiner ursprünglich für die Verwertung der Gewichtsversuche aufgestellten Formel ('60, I, 104; '84, '85) und G. E. Müller ('79) auf Grund gewisser psychologischer Annahmen rechnerische Beziehungen zwischen den ermittelten und gesuchten Größen aufgestellt haben. Eine vergleichende Prüfung der Leistungsfähigkeit der verschiedenen Methoden findet sich in den beiden letztgenannten Schriften Fechners ('84, '85). Er nimmt dort bezug auf neue mit besonderer Vorsicht und mancherlei Abänderungen von Camerer ('83) durchgeführte Versuchsreihen und tritt entschieden für seine (Fechners) Berechnungsweise ein.

Anstatt die für verschiedene Hautstellen äquivalenten Abstände nach der eben beschriebenen Methode der r. und f. Fälle durch Rechnung aus den Versuchen abzuleiten, kann man auch eine unmittelbare Bestimmung ausführen, indem man die eine Hautstelle mit stets demselben überschwelligen Spitzenabstand berührt und die zu vergleichende Hautstelle mit einem (subjektiv) deutlich größeren oder kleineren, worauf man sich durch schrittweise Änderung des Abstandes der scheinbaren Gleichheit nähert.

Dies ist die Methode der Äquivalente, die in oben erwähnten Gewichtsvergleichungen Webers ein Analogon besitzt. Darstellungen der Methode finden sich bei Fechner ('60 I 131; '84), Versuche nach ihr sind mehr beiläufig von Weber ('52), ausführlicher von Fechner (a. a. O.) und besonders von Camerer ('87) unternommen worden, welch letzterer zeigte, daß sie durchaus nicht so einfach zu deutende Ergebnisse liefert, als man fürs erste erwarten sollte.

Den erheblichen Einfluß, den die Übung auf die Ergebnisse aller Bestimmungen im Gebiete der Raumschwellen besitzt, hat zuerst Volkmann ('58) aufgedeckt. Weitere Untersuchungen hierüber stammen von Dresslar ('94), Tawney ('98) und Binet ('03). Letzterer hat auch den Vexierfehlern ein eingehendes Studium gewidmet. Man vgl. hierzu auch Henri und Tawney ('95). Auf die Einflüsse, die eine Reihe weiterer Variablen auf den Wert der Raumschwelle haben, wie die Temperatur und der Blutreichtum der Haut, Narkose und andere chemische Einwirkungen, Ermüdung u. a. m. kann hier nicht näher eingegangen werden. Literatur hierüber findet sich bei Judd ('96).

Da für die Bestimmung der simultanen Raumschwelle Gleichzeitigkeit und Abgleichung der Reize von großer Bedeutung sind, hat Brückner ('01), der unter der Leitung v. Freys arbeitete, die Reizkörper (die stumpfen Enden zweier Nadeln) dauernd auf der Haut (bezw. den gewählten Druckpunkten) ruhen lassen, mit so geringem Gewicht, daß sie für gewöhnlich keine Empfindung erregten. Die Reizung erfolgte dadurch, daß die Holz-

hebel, in denen die Nadeln befestigt waren, durch kleine Elektromagnete gegen die Haut bewegt wurden mit einer Kraft, die von dem veränderlichen Abstand zwischen Magnet und Anker abhing (Fig. 18). Durch eine besondere Schaltvorrichtung konnte der Strom nach Belieben durch beide, oder, ohne Änderung seiner Stärke, durch einen der beiden Elektromagnete geschickt werden, wodurch die Einschaltung von Vexierversuchen möglich war. Brückner hat die Einrichtung weniger zur Ermittlung bestimmter Schwellenwerte als zum Studium einer Anzahl von Einflüssen auf dieselben benutzt.

Eine zweite von Volkmann ('44) eingeführte, später auch von Weber ('52) benutzte Prüfung der Feinheit des Ortssinnes der Haut besteht darin, daß der Versuchsleiter eine Hautstelle des Beobachters berührt und letzterer, unter Ausschluß des Gesichtes, den Ort anzeigt, wo die Berührung seiner Meinung nach stattgefunden hat. Indem er dies mit einer Sonde tut, erhält er eine neue Empfindung, die mit der ersten verglichen wird. Um diese zweite Empfindung zu vermeiden, haben Henri ('93, '98, 118) sowie Pillsbury ('95) den vermeintlichen Ort der Reizung auf einer lebensgroßen Photographie des fraglichen Körperteils oder auf einem Gipsabguß desselben angeben lassen. In dieser Form ist der Versuch nur für Körperabschnitte verwertbar, die der Selbstbeobachtung durch das Auge leicht zugänglich und für welche genügend deutliche optische Erinnerungsbilder vorhanden sind. Spearman ('06) hat die Nachbildungen ersetzt durch eine leere Fläche, die sich dicht über dem gereizten Gliede befand und dasselbe völlig verdeckte. Die Versuchsperson mußte bei geschlossenen oder offenen Augen den Punkt der Fläche bezeichnen, unter dem nach ihrer Meinung die gereizte Hautstelle gelegen war. In letzter Zeit ist Ponzo ('09) zum zweiten Weberschen Verfahren zurückgekehrt, das er dahin abänderte, daß nicht beliebige Hautstellen gereizt wurden, sondern nur einzelne ausgewählte Druckpunkte. Bezüglich des Aufzeigeverfahrens überhaupt sei bemerkt, daß von seiten des Bewegungsapparates diesen Versuchen keine in Betracht kommenden Fehler drohen, denn die Einstellung der Hand auf einen vorgegebenen Ort ist unter günstigen Bedingungen von ganz außerordentlicher Feinheit. Man vgl. darüber Einthoven ('04) sowie Spearman ('06, 428).

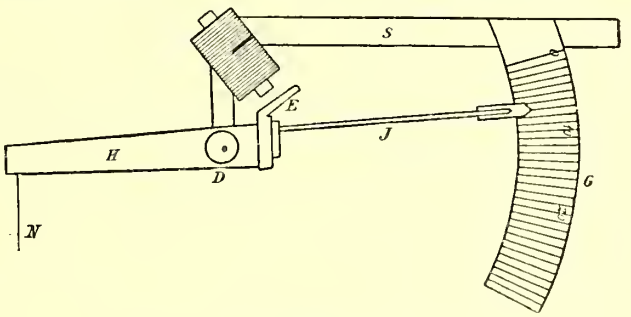


Fig. 18.
Elektromagnetischer Reizhebel (Brückner).

Die wenigen Zahlen, die Volkmann und Weber in ihren Mitteilungen über das zweite Verfahren anführen, lassen bereits erkennen, daß der Abstand, in welchem zwei hintereinander einwirkende Reize nicht mehr unterscheidbar sind, kleiner ist, als bei simultaner Reizung. Aber erst Lotze ('52, 401) und Czermak ('55, '56) haben auf die theoretische Bedeutung dieser

Tatsache hingewiesen, letzterer auch die nach beiden Verfahrungsarten gewonnenen Raumschwellen miteinander verglichen. Eine systematische Untersuchung der sukzessiven Raumschwelle hat Judd ('96) veröffentlicht, der auch einen Reiz von konstanter Intensität anwandte, bestehend aus einem beinernen Stift, der durch ein Gewicht beschwert zuerst auf die eine und dann auf die andere Hautstelle aufgesetzt wurde. Die Verschiebung konnte an einem Maßstab abgelesen werden (Fig. 19). Zu einer zweiten Versuchsreihe verwendete er 2 gleichartige Reizstifte, die nacheinander in dem gewählten Abstande auf die Haut gesetzt wurden, so daß schließlich für kurze Zeit beide Stifte auf der Haut ruhten. Über eine weitere Ver-

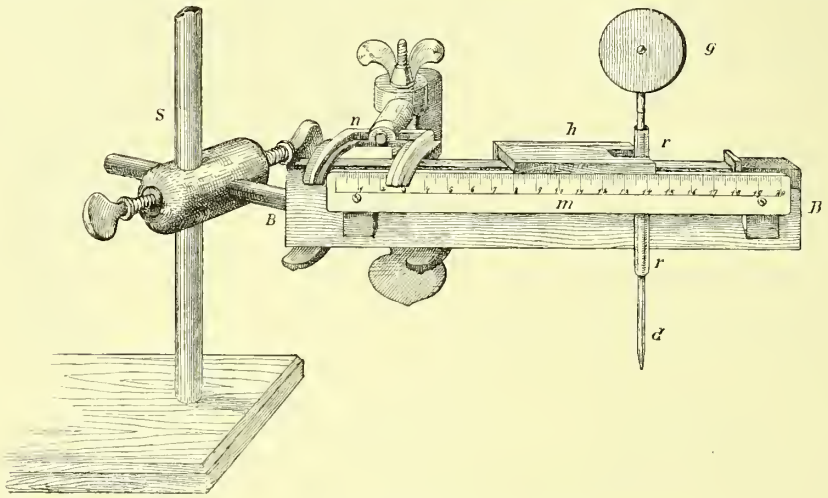


Fig. 19.
Einrichtung zur Bestimmung der Raumschwelle bei sukzesiver Reizung (Judd).

suchsreihe Judds zur Bestimmung der Schwelle der erkennbaren Größe siehe unten. Endlich haben v. Frey und Metzner ('02), v. Frey ('02) die Beziehung der Sukzessivschwelle zur räumlichen Verteilung der Druckpunkte untersucht und sich hierzu der elektromagnetischen Reizhebel bedient, die schon Brückner ('01) benutzt hatte. Durch einen rotierenden Unterbrecher konnte das Intervall zwischen den beiden Reizen in weiten Grenzen abgeändert werden.

Bei der Simultanreizung der Haut geht die einfache Empfindung nicht sprungweise in die doppelte über, sondern es besteht eine Überleitung, dargestellt durch Abstände, in welchen die beiden Reize noch nicht als getrennt empfunden werden, aber den Eindruck von etwas breitem oder einer Linie machen. Man nennt diesen Abstand im Anschluß an Fechner die Schwelle der erkennbaren Größe oder kurz Linienschwelle. Man kann auch von einer Formschwelle sprechen, indem hier zu der dimensional nicht näher bestimmten, örtlich begrenzten oder punktförmigen Empfindung die Wahrnehmung einer Ausdehnung hinzutritt. Die Linienschwelle und ebenso die Schwellen für entwickeltere Raumformen verschiedener Größe sind mit

sehr einfachen Hilfsmitteln untersucht worden. Judd ('96) benutzte Kartonstreifen, Eisner ('88) Hartgummischeiben, die mittels einer Handhabe auf die Haut gesetzt wurden. Nichols ('94) hat mit Linien, Flächen, Hohlkörpern und Punktreihen gearbeitet. Toulouse und Vaschide ('00) fertigten einfache geometrische Figuren aus Kupferblech und steigerten den auf dieselben ausgeübten Druck, bis die Form erkannt wurde. Thompson und Sakijewa ('02) nahmen quadratische und runde Scheiben wechselnder Größe aus Kork, die sie mit Bleistückchen oder einem Spiralfederdynamometer in verschiedenem Grade belasteten. (Fig. 20.) Über die Erkennung auf die Haut geschriebener Zeichen haben Weber ('52, 98) und Churchill ('02) Mitteilungen gemacht.

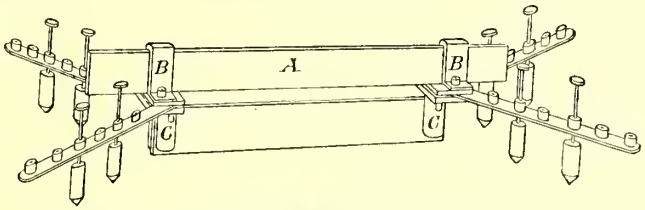


Fig. 21.
Einrichtung zum Nachweis des Einflusses von Nebenreizen auf die Schätzung der Länge linearer Hautreize (Pearce).

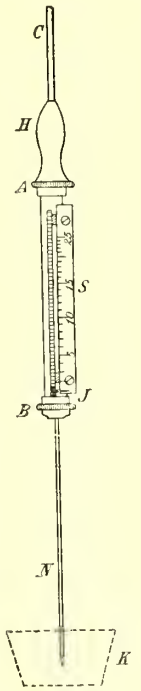


Fig. 20.
Dynamometer mit Korkscheibe (Thompson & Sakijewa).

Außer den bereits erwähnten Vexierfehlern und dem ebenfalls erwähnten, von Thunberg ('05) beschriebenen Verfahren zur Erzeugung der Empfindung starker Glätte sind noch mehrfach Anordnungen beschrieben worden, durch die Täuschungen im Gebiete des Drucksinnes entstehen. Dahin gehört die Beeinflussung von Druckempfindungen durch gleichzeitige Temperaturempfindungen (Weber, Szabadföldi); die Verwechslung von Druck- und Wärmeempfindung (Fick und Wunderli), von Druck- und Zugreizen (v. Frey '97, Clark '98), von Entlastung mit Belastung (v. Frey '96, 185), das Verschwinden der Druckempfindung vor Aufhören des Reizes, das namentlich bei kleinflächiger Reizung allen Untersuchern aufgefallen ist, die Nachdauer der Druckempfindung über die Dauer des Reizes hinaus, die veränderte Auffassung eines Hauptreizes durch ihn begleitende Nebenreize (Pearce '03 (Fig. 21), Jaensch '06), verkehrte Lokalisation (Henri '98, 66, Stransky '99) u. a. m. In betreff der Über- oder Unterschätzung ausgefüllter Strecken gegenüber leeren vgl. man Rieber ('03), und Cook ('10).

Versuche, die Empfindlichkeit gewisser tierischer Organe gegen Druck oder Spannung nachzuweisen, mit Hilfe der Aktionsströme in den zugehörigen afferenten Nerven sind von S. Fuchs ('95) für die unter der Haut liegenden Kanalsysteme der Selachier, von Steinach ('96) für die Haut des Frosches, von Köster und Tschermak ('02) für die Enden des Nervus depressor in der Wand der Aorta ausgeführt worden. Ein näheres Eingehen auf das hierbei geübte Verfahren muß indessen einem anderen Abschnitt dieses Handbuches vorbehalten bleiben.

Literatur.

S. Alrutz, '05, Skand. Archiv f. Physiol. **17**, 86.
G. F. Arps, '09, Psychologische Studien **4**, 431.
Aubert und Kammler, '58, Moleschotts Untersuchungen etc. **5**, 145.
Bastelberger, '79, Drucksinnmessung. Preisschrift, Straßburg.
A. Binet, '03, Année psychol. **9**, 235.
M. Blix, '84, Zeitschr. f. Biol. **20**, 141.
— '85, Ebenda **21**, 145.
A. M. Bloch, '79, Travaux du lab. de Marey '78/79. 259.
— '91, Archives de physiol., 5. sér. **23**, 322.
J. J. Graham Brown, '02, Journ. of Physiol. **27**. 85.
— '02, Neurolog. Zentralbl. **21**, 882.
Brown-Séquard, '58, Journ. de la physiol. **1**, 344.
A. Brückner, '01, Zeitschr. f. Psychol. **26**, 33.
W. Camerer, '81, Zeitschr. f. Biol. **17**, 1.
— '83, Ebenda **19**, 280.
— '85, Ebenda **21**, 527.
— '87, Ebenda **23**, 509.
W. Churchill, '02, Philos. Studien **18**, 478.
G. P. Clark, '98, Americ. Journ. of Physiol. **1**, 346.
H. D. Cook '03 Arch. f. d. ges. Psych. **16**.
J. Czermak, '55, Sitzber d. Akad. d. Wissensch. Wien, math.-naturw. Klasse **17**, 589.
— '56, Moleschotts Unters. **1**, 195.
R. Dohrn, '61, Zeitchr. f. rat. Med., 3. Reihe, Bd. **10**, 339.
F. B. Dresslar, '94, Americ. Journ. of Psychol. **6**, 313.
W. Einthoven, '04, Arch. internat. de physiol. **1**, 72.
M. Eisner, '88, Diss. Erlangen.
A. Eulenburg, '65, Berl. klin. Wochenschr., Nr. 52.
— '69, Ebenda Nr. 40.
G. Th. Fechner, '60, Elemente der Psychophysik. Leipzig, Breitkopf & Härtel.
— '84, Abh. d. math.-phys. Klasse d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig **13**, 109.
— '85, Zeitschr. f. Biol. **21**, 527.
A. Fick (und Wunderli), '60, Moleschotts Unters. etc. **7**, 393.
Ges. Schriften **3**, 521.
M. von Frey, '94A, Ber. d. Gesellsch. der Wissensch. Leipzig **46**, 185.
— '94B, Ebenda **46**, 283.
— '95, Ebenda **47**, 166.
— '96, Abh. d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig, math.-phys. Klasse **23**, 175.
— '97, Ber. d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig **49**, 463.
— '99, Sitzber. d. physik.-med. Gesellsch. Würzburg 97.
— '02, Ebenda 54.
M. v. Frey und F. Kiesow, '99, Zeitschr. f. Psychol. **20**, 126.
M. v. Frey und R. Metzner, '02, Ebenda **29**, 161.
Sigm. Fuchs, '95, Archiv f. d. ges. Physiol. **59**, 454.
R. Funke, '91, Festschrift zur Zentenarfeier des Allgemeinen Krankenhauses in Prag. Berlin. Fischer.
A. Goldscheider, '84, Monatsh. f. prakt. Dermatol. 3. Ges. Abh. I, Nr. 3.
— '85, Archiv f. Physiol., Suppl.-Bd. S. 1. Ges. Abh. I. Nr. 7.
F. Goltz, '63, Zentralbl. f. d. med. Wissensch. **1**, 273.
V. Grandis, '02, Archives ital. de biol. **37**, 96.
H. Griesbach, '97, Archiv f. d. ges. Physiol. **68**, 65.
H. Griffing, '95, The Psychological Review, Monograph Supplem. Nr. 1.
S. Hall und Y. Motora, '87, The Americ. Journ. of Psychol. **1**, 72.
G. Hartmann, '75, Zeitschr. f. Biol. **11**, 79.
H. Head und Th. Thompson, '06, Brain **29**, 537.
H. Head siehe auch Rivers.

V. Henri, '93, Archives de physiol., S. 619.
— '98, Die Raumuntersuchungen des Tastsinnes. Berlin, Reuther & Reichard.
V. Henri und G. Tawney, '95, Philos. Studien **11**, 394.
V. Hensen, '93, Archiv f. Ohrenheilk. **35**, 173.
E. Jaensch, '06, Zeitschr. f. Psychol. **41**, 280, 382.
Ch. H. Judd, '96, Philos. Studien **12**, 409.
F. Kiesow und A. Fontana, '01, Archives ital. de biol. **36**, 303.
F. Kiesow, '02, Wundts Philos. Studien **19**, 260.
— '04A, Zeitschr. f. Psychol. **35**, 8.
— '04B, Ebenda **35**, 234.
F. Klug, '77, Archiv f. Physiol., S. 275.
G. Köster und A. Tschermak, '02, Archiv f. d. ges. Physiol. **93**, 24.
R. Kottenkamp und H. Ullrich, '70, Zeitschr. f. Biol. **6**, 37.
P. Kowalewski, '76, Medizin. Anzeiger, Nr. 18 (russisch). Zitiert nach d. Jahresber. f. Anat. u. Physiol. 1876, II, 154.
Lalanne, '76, Compt. rend. de l'acad. des scienc. **82**, 1314 und Journ. de l'anat. et de la physiol. 449.
R. H. Lotze, '52, Medizinische Psychologie. Leipzig, Weidmann.
G. Meißner, '59, Zeitschr. f. rat. Med., 3. Reihe, Bd. **7**, S. 92.
A. Michotte, '05, Les signes régionaux, Paris, Alcan.
G. E. Müller, '79, Archiv f. d. ges. Physiol. **19**, 191.
W. Nagel, '95, Ebenda **59**, 595.
H. Nichols, '94, Our notions of number and space, vol. I. Boston, Ginn.
A. Paulus, '71, Zeitschr. f. Biol. **7**, 237.
H. J. Pearce, '03, Archiv f. d. ges. Psychol. **1**, 31.
W. B. Pillsbury, '95, Americ. Journ. of Psychol. **7**, 42.
M. Ponzo, '09, Memorie Reale Accad. Torino, ser. 2, tom. **60**, 41.
A. Riecker, '73, Zeitschr. f. Biol. **9**, 95.
— '74, Ebenda **10**, 177.
Ch. H. Rieber, '03, Psychol. Review Mon. Suppl. IV, 47.
W. H. R. Rivers und H. Head, '08, Brain **32**.
Rumpf, '84, Archiv f. Psychiatrie **15**.
— '89, Neurolog. Zentralbl. **8**, 7.
C. E. Seashore, '96, Studies from the Yale Psychol. Laborat. **4**, 27.
G. Sergi, '92, Zeitschr. f. Psychol. **3**, 175.
Sieveking, '58, Brit. Review und Schmidts Jahrbücher **101**, 164.
C. Spearman, '06, Psychol. Studien (Wundt) **1**. 390.
E. Steinach, '96, Archiv f. d. ges. Physiol. **63**, 495.
E. Stransky, '99, Wien. klin. Wochenschr., Nr. 32 und 33.
— '00, Jahrb. f. Psychiatrie und Neurologie.
G. M. Stratton, '96, Philos. Studien **12**, 525.
M. Szabadföldi, '65, Moleschotts Unters. etc. **9**, 624.
G. A. Tawney, '98, Philos. Studien **13**, 163.
H. B. Thompson und K. Sakijewa, '02, Zeitschr. f. Psychol. **27**, 187.
T. Thunberg, '95, Upsala läkareför. förh. **1**, 294.
— '05, Skand. Archiv f. Physiol. **17**, 302.
Treitel, '05, Archiv f. Psychiatrie **40**, 419.
W. Trotter und H. M. Davies, '09, The Journ. of Physiology **38**, 134.
Toulouse und Vaschide, '00, Compt. rend. de l'acad. des scienc. **130**, 669.
— '00, Ebenda **131**, 128.
N. Vaschide und P. Rousseau, '02, Ebenda **135**, 259.
K. Vierordt, '77, Grundriß der Physiologie des Menschen, 5. Aufl. Tübingen, Laupp.
A. W. Volkmann, '44, Wagners Handwörterb. d. Physiol. **2**, 571.
— '58, Berichte d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig **10**, 38.
E. H. Weber, '46, Die Lehre vom Tastsinn und Gemeingefühl etc. in R. Wagners Handwörterb. d. Physiol., 3. Bd., 2. Abt. Braunschweig, Vieweg.
— '51, Dasselbe in besonderem Abdruck, gleicher Verlag.

E. H. Weber, '52, Berichte d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig, math.-phys. Klasse 4, 85.
von Wittich, '69, Archiv f. d. ges. Physiol. 2, 329.
W. Wundt, '02, Grundzüge der physiologischen Psychologie, 5. Aufl. Leipzig, Engelmann.

III. Schmerzempfindungen.

Die Methoden zur Untersuchung und Messung der Schmerzempfindlichkeit der Haut — Algesimetrie — sind, verglichen mit denen für das Studium der Druckempfindung, in quantitativer Richtung noch wenig entwickelt; sie sind aber viel mannigfaltiger, weil die Schmerzempfindung durch Wärme und Kälte, durch mechanische, chemische und elektrische Einwirkungen hervorgerufen werden kann.

Bei ihrer Anwendung kommen neben der Abstufung der Stärke oder Intensität noch folgende Gesichtspunkte in Frage: Die Wirkung kann

1. der Fläche nach eine umschriebene oder ausgebreitete sein;
2. nur oberflächlich stattfinden oder auch in die Tiefe dringen;
3. andauernd oder vorübergehend sein.

1. Mechanische Reize.

Von den mechanischen Reizmitteln besitzen Nadeln die kleinste Wirkungsfläche und sie sind daher von Blix ('85, 159), Goldscheider ('85, Ges. Abh. I, 197), v. Frey ('94A, 191) benutzt worden, um die örtlich ungleiche Empfindlichkeit der Haut gegen Einstich nachzuweisen. Die Nadel ist auch das Mittel, durch welches bei der klinischen Untersuchung die Schmerzempfindlichkeit fast ausschließlich untersucht wird. Führt man sie mit der Hand, so ist es natürlich nicht ganz leicht, die aufgewendete Kraft bzw. die Tiefe des Eindringens genau zu beherrschen. v. Frey (96, 241) hat daher meist auf den Gebrauch von Nadeln verzichtet und seine Reizhaare (s. oben) verwendet, die er aber für diesen Zweck eichte nach der auf die Flächeneinheit wirkenden Kraft. Um an Hautflächen geringer Schmerzempfindlichkeit eine vollständige Aufnahme aller Schmerzpunkte zu erzielen, hat er starke Reizhaare (Pferdehaare) zur Verkleinerung der Wirkungsfläche mit dem Messer zugeschärft. Auch eine Kombination von Reizhaar und Nadel hat er versucht, indem er an das Ende des ersteren einen feinen Opuntienstachel klebte. In besserer Form ist derselbe Gedanke von Trotter und Davies ('09, 151) ausgeführt worden (Fig. 22). Die Nadel, die in einer Führung leicht spielt, trägt an ihrem stumpfen Ende ein kleines Bleikügelchen. Dasselbe ist an der der Nadel abgewendeten Seite ausgehöhlt zur Aufnahme des freien Endes des Reizhaares. Wird die Nadel auf die

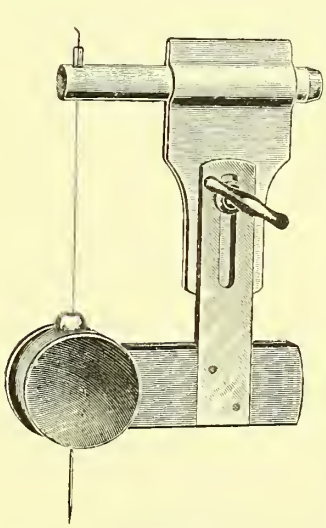


Fig. 22.
Algesimeter von Trotter & Davies.

Haut gesetzt, so sucht sie gegen das Haar auszuweichen, findet aber hierbei einen der Kraft des Haares entsprechenden Widerstand, der durch die Nadel auf die Haut übertragen wird. Der Griff des Reizhaares und die Führungshülse der Nadel sind durch ein leichtes Querstück verbunden. Die ganze Vorrichtung ist so einfach, daß sie in jedem Laboratorium leicht angefertigt und, wenn nötig, in Mehrzahl bereit gehalten werden kann. Je nach der Kraft des gewählten Reizhaares erhält man Schmerzreize von verschiedener Intensität. Man könnte der Nadel auch dadurch eine Führung

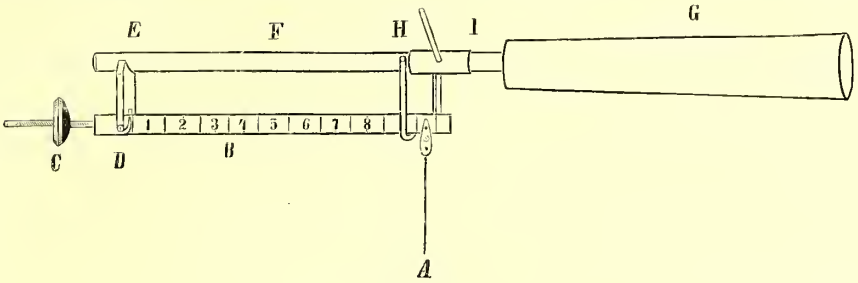


Fig. 23.
Algesimeter von Thunberg.

geben, daß man sie an einem leichten einarmigen Hebel befestigt. Es würde dann im Gebrauch die Beschränkung auf lotrechte Nadelstellung entfallen.

Dieselbe Beschränkung gilt auch für das von Thunberg (05) angegebene Algesimeter (Fig. 23). Es besteht im wesentlichen aus einem ungleicharmigen äquilibrierten Hebel, mit dessen langem Arm die Nadel gelenkig

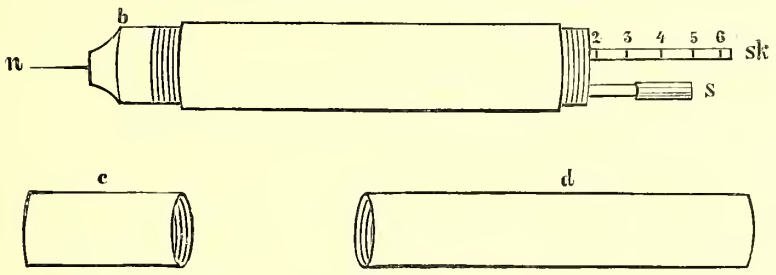


Fig. 24.
Algesimeter von Alrutz.

verbunden ist. Durch ein kleines Laufgewicht kann der von der Nadel ausgeübte Druck abgestuft werden. Thunberg veränderte auch die einwirkende Fläche, indem er Nadeln unter Kontrolle durch das Mikroskop bis zu dem gewünschten Querschnitt abschliff. Er fand, daß für die kleinsten Flächen (von 0,001 mm^2 abwärts) der Erfolg unabhängig wird von der Fläche, so daß die Reizschwellen durch die Belastung der Nadel gemessen werden können. Gebraucht man stets dieselbe Nadel, so ist selbstverständlich die genannte Messungsart für jeden Querschnitt richtig. Der Apparat ist die Umbildung einer Einrichtung, die von demselben Verfasser benutzt worden

ist ('01 B, 423), um die auf einen Einstich unter Umständen auftretenden doppelten Schmerzempfindungen zu beobachten. Nadelalgesimeter mit Gewichtsbelastung sind ferner von Philippe ('96) und Vannod ('96) beschrieben worden.

Algesimeter, bei welchen der Grad der Einwirkung bemessen wird nach der Länge, mit welcher die Nadel oder ein konisch zugeschliffener Stift aus der Schutzhülse hervorragt, sind von Heß ('92), Moczutkowski ('98), Kulbin ('96) und von Bechterew ('99) beschrieben worden. Die beiden letzteren Verfasser lassen die Nadel aus der Hülse hervorschnellen, Kulbin durch einen Elektromagneten, von Bechterew durch Federkraft. Bei dem Algesimeter von Alrutz ('08 B) schiebt sich die Nadel mit 10^{-4} mm^2 Spitzenfläche beim Aufsetzen auf die Haut in die Hülse zurück, wobei eine feine

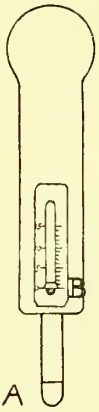


Fig. 25.
Algesimeter mit stumpfem Ende (Griffing).

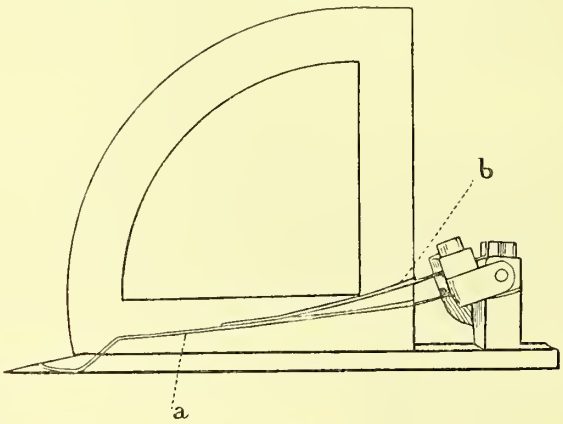


Fig. 26.
Vorrichtung für schmerzhafte Momentanreize (Thunberg).

Spiralfeder zusammengedrückt wird. Die Spannung der Feder und damit die Stärke des Reizes ist einstellbar (Fig. 24).

Algesimeter größerer Wirkungsfläche, meistens in Form stumpfer Drahtenden sind ebenfalls mehrfach angegeben worden, so von Buch ('91 und '92) mit konstanter oder abgestufter Belastung, von Griffing ('95), Mac Donald ('98), Boas ('02), Head und Thompson ('07) u. a. Als Beispiel diene die Anordnung von Griffing a. a. O. (Fig. 25). Untersuchungen über das Verhältnis zwischen Belastung und Fläche in Hinsicht auf gleiche Reizwirkung liegen vor von Griffing ('95, 69) und von Frey ('96, 246), die darin übereinstimmen, daß mit der Fläche auch die Belastung zunehmen muß. Griffing findet das Verhältnis mit der Fläche abnehmend, v. Frey dagegen annähernd konstant. Abweichend von den bisher erwähnten Vorrichtungen ist das Algesimeter von Björnström ('77), das aus einer Pinzette besteht, mit der eine abgehobene Hautfalte gekniffen wird. Die Stärke der Einwirkung wird auf einer Teilung abgelesen. Ähnlich ist Richet verfahren ('77).

Eine Vorrichtung zur Erteilung schmerzhafter Reize von sehr kurzer Dauer hat Thunberg ('01 B, 422) angegeben. (Fig. 26). Sie besteht aus einem Stück Klaviersaite, die auf einem passend geformten Rahmen befestigt und so gebogen ist, daß sie der Haut tangential anliegt. Wird sie längs einer Gradteilung aufgebogen und freigelassen, so schnellt sie gegen die Haut zurück mit einer Kraft, die von dem Grade der Aufbiegung abhängt. Durch eine besondere, der Klaviersaite angelegte Spannfeder b kann diese Kraft noch vergrößert werden.

2. Thermische Reize.

Donath ('85) bestimmte die Temperaturen, bei welchen sich einerseits zur Kälte-, andererseits zur Wärmeempfindung Schmerz hinzugesellt, mit Hilfe besonderer Thermometer, die er als Kryalgimeter und Thermalgimeter bezeichnet. Das Kryalgimeter hat ein Quecksilbergefäß in Form einer ebenen Spirale, die durch Ätherspray abgekühlt wird. Das Quecksilbergefäß des Thermalgimeters wird durch einen umgewickelten Platindraht elektrisch erwärmt. Es erscheint zweifelhaft, ob die Temperaturen der Thermometer und der Haut übereinstimmten (man vergl. die Kritik Thunbergs, '05). Veress ('02) hat für die verschiedenen Körperregionen die Temperatur zu bestimmen gesucht, welche Wärmeschmerz hervorruft. Er bediente sich des Konus von Blix (s. oben S. 2), dem er eine ebene Endfläche von etwa 28 mm^2 gab. Die Bestimmungen wurden nicht mit konstanten, sondern steigenden und zwar ziemlich rasch steigenden Temperaturen ausgeführt (0,5—1 ° pro Sek.). Bei dieser Sachlage ist es sehr unwahrscheinlich, daß das Thermometer der Temperatur des Wassers folgen konnte, und es ist daher zu vermuten, daß die schmerzhaften Grenztemperaturen zu niedrig abgelesen worden sind, wenigstens an allen Hautstellen, welche infolge dünner Epidermis sich auf die Temperatur des Konus rasch einstellen konnten. An Stellen mit dicker Epidermis kann der Fehler aber auch in entgegengesetzter Richtung liegen, worauf übrigens der Verfasser selbst aufmerksam gemacht worden ist (S. 13). Eine Bestimmung der Einstellungsgeschwindigkeit des Thermometers scheint nicht erfolgt zu sein. Ein weiterer Nachteil des Verfahrens besteht, wie auch Alrutz ('06) hervorgehoben hat, darin, daß durch die veränderliche Temperatur und die überdies noch wechselnde Änderungsgeschwindigkeit derselben die Adaptationsvorgänge sehr unübersichtlich werden. Vorzüglich geeignet zum Studium der thermischen Schmerzempfindung haben sich erwiesen die von Thunberg ('94, '01) eingeführten, oben beschriebenen Reizlamellen sowie dessen Temperator. Die Temperaturänderungen, welche erstere auf der Haut bewirken, laufen so rasch ab, daß eine Adaptation während derselben nicht zu befürchten ist; der Temperator ist besonders geeignet, einer Hautstelle eine bestimmte Temperatur zu erteilen. Über die Verwendung der beiden Werkzeuge vergleiche man Thunberg ('01, 398, 404), Alrutz ('05, 427; '08 A, 389, '08 B, 249).

3. Chemische Reizung

der „Gefühlsnerven", der Mundhöhle ist von Stich und Klaatsch ('59) beobachtet und als unabhängig von den Geschmacksempfindungen erkannt

worden. Sie benutzten Capsicum, Pfeffer, ätherische Öle und Balsame. Goldscheider ('86, Ges. Abh. I, 253) erwähnt, daß Menthol auf der Haut neben Kälteempfindung auch Stechen, Prickeln und Brennen, an empfindlichen Teilen Schmerz hervorruft. Rollet ('99) hat die Wirkung von Chloroform, Äther und Menthol auf der äußeren Haut und verschiedenen Schleimhautflächen untersucht und auf die schmerzhaften Qualitäten aufmerksam gemacht. In letzter Zeit hat sich Alrutz ('08 B) eingehend mit der chemischen Reizung der Schmerznerven beschäftigt.

4. Elektrische Reizung.

Werden konstante oder induzierte Ströme der befeuchteten Haut durch feine Pinsel oder sehr kleinflächige metallische Elektroden zugeführt, so tritt die schmerzhafte Wirkung stark in den Vordergrund. Schärfere Beobachtung läßt aber erkennen, daß von den als Temperatur- und Druckpunkte bezeichneten Orten im allgemeinen auch die entsprechenden Empfindungen ausgelöst werden können. Für diese Versuche ist es zweckmäßig, der Anode des konstanten Stromes bzw. der Öffnungsinduktionsströme eine große Fläche zu geben (indifferente Elektrode) und die kleinflächige (differente) Elektrode so zu gestalten, daß sie auf der Haut mit geringem und gleichmäßigem Druck aufliegt, nicht kratzt und thermisch möglichst indifferent ist. Dies läßt sich durch eine in warmes Wasser (oder Kochsalzlösung) getauchte feine Pinselelektrode, aber auch durch ein federndes Drähtchen erreichen, das man in der Flamme stumpf schmilzt. Es nimmt, auf der Haut ruhend, bald deren Temperatur an. Die Empfindung ist stichartig, bei Reizung mit Wechselströmen kontinuierlich andauernd, nicht intermittierend; sie ist nicht von allen Hautstellen auslösbar. Die Reizschwelle ist an den verschiedenen Hautgebieten merklich konstant, wenn die Unterschiede des Widerstandes ausgeglichen werden (Tschiriew und de Wattville '79: de Voys (und Rumpf) '84) und für die Schmerzempfindung häufig etwas niedriger als für Druck und Temperatur (v. Frey '94 B, 290). Über das Auftreten sekundärer Schmerzempfindungen bei Reizung mit zwei oder mehreren Induktionsschlägen haben Goldscheider ('90 A), Gad und Goldscheider ('91), bei Reizung mit einem einzigen Induktionsschlag Thunberg ('01 B) berichtet. Letzterer benutzte als differente Elektrode eine Nadel, die er in die Haut ganz oberflächlich einstach, um Verschiebungen auszuschließen. Nach Winkler ('07) wird die Haut durch Gleichströme niederer Spannung analgetisch.

5. Die Reaktionszeit der Schmerzempfindung.

O. Rosenbach ('84, '89) hat bei flüchtiger Berührung heißer Körper das gegen Druck und Wärme verspätete Eintreten des Schmerzes hervorgehoben. Naunyn ('89) hat mit wiederholten schwachen mechanischen und elektrischen Reizen spät auftretende Schmerzempfindung bei Tabikern beobachtet und die Abhängigkeit des Erfolges von Zahl, Stärke und Intervall der Reize näher studiert. Goldscheider ('90 B) maß in einem pathologischen Falle eine Latenzzeit von 1—2 Sekunden für den Schmerz. Genaue Messungen der Reaktionszeit für die sekundäre Schmerzempfindung sind zuerst von Gad und Goldscheider ('91) mitgeteilt worden. Sie erzeugten

durch Metronom, magnetischen Hammer oder Stimmgabel eine zeitlich begrenzte Reihe von Induktionsschlägen, die auf die Haut wirkten, und zu gleich auf der berußten Trommel des Kymographions verzeichnet wurden. Die Versuchsperson schrieb auf derselben Trommel den Eintritt der (sekundären) Empfindung. Thunberg (01 B) hat die Reaktionszeiten für Schmerz bei thermischer und mechanischer Reizung gemessen, wobei er sowohl die primäre wie sekundäre Phase berücksichtigte. Die Pole einer Batterie waren

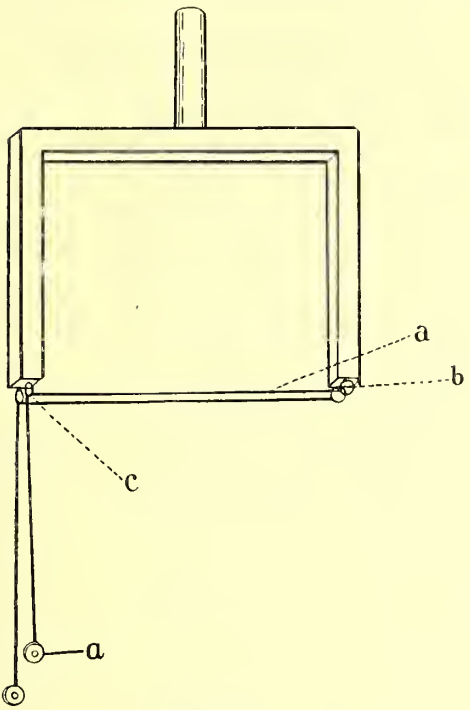


Fig. 27.
Vorrichtung zur Messung der Reaktionszeit der Schmerzempfindung bei thermischer Reizung (Thunberg).

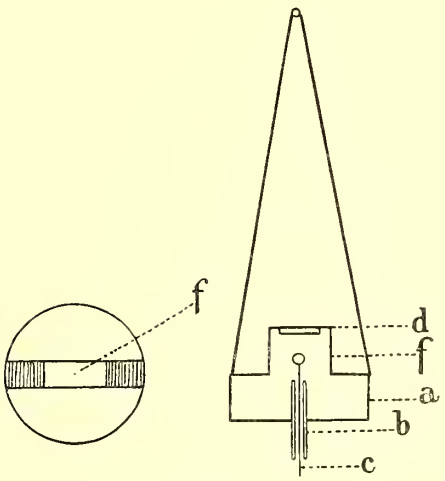


Fig. 28.
Vorrichtung zur Messung der Reaktionszeit der Schmerzempfindung bei mechanischer Reizung durch den Stich der Nadel C (Thunberg).

mit 2 sehr feinen, parallel nebeneinander gespannten Drähten verbunden, welche die zu prüfende Hautstelle berührten (Fig. 27). Das Aufsetzen der Reizlamelle oder des Temperators bewirkte den Stromschluß, der auf der berußten Trommel verzeichnet wurde. Das zweite Zeichen gab bei Eintritt der Empfindung die Versuchsperson. Zur mechanischen Reizung diente eine Nadel, die leicht in einer Führung spielte und mit dem einen Pol der Batterie verbunden war. Den anderen Pol bildete das Gewicht, das zur Reizung auf die Nadel heruntergelassen wurde (Fig. 28).

Literatur.

S. Alrutz, '05A, Skand. Archiv f. Physiol. **17**, 86.
— '05B, Ebenda **17**, 414.
— '06, Ebenda **18**, 1.
— '08A, Ebenda **20**, 371.
— '08B, Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. **34**, 478.
— '08C, Skand. Archiv f. Physiol. **21**, 237.
v. Bechterew, '99, Neurolog. Zentralbl.
Björnström, '77, Nova acta soc. scient. Upsala, zitiert nach Thunberg '05.
M. Blix, '82, Upsala läkareför. förh. **18**, 427.
— '85, Zeitschr. f. Biol. **21**, 145.
Boas, '02, Magenkrankheiten, Teil 1, S. 93. Leipzig; zitiert nach Thunberg '05.
Buch, '91 und '92, Petersb. med. Wochenschr.; zitiert nach Thunberg 05.
J. Donath, '85, Archiv f. Psychol. u. Nervenkrankh. **15**, 695.
M. v. Frey, '94A, Ber. d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig, math.-phys. Klasse **46**, 185.
— '94B, Ebenda **46**, 283.
— '96, Abh. d. Gesellsch. d. Wissensch. Leipzig **23**, 175.
A. Goldscheider, '85, Archiv f. Physiol., Suppl.-Bd. S. 1. Ges. Abh. I Nr. 7.
— '86, Ebenda. Ges. Abh. I Nr. 9.
— '90A, Ebenda. Ges. Abh. I Nr. 18.
— '90B, Deutsche med. Wochenschr., Nr. 31.
— '91, Zeitschr. f. klin. Med. **20**.
Griffing, '95, The Psychological Review, Monograph Suppl. Nr. 1.
H. Head und Th. Thompson, '06, Brain **29**, 537.
Hess, '92, Deutsche med. Wochenschr.; zitiert nach Thunberg '05.
Kulbin, '96, L'année psychologique; zitiert nach Thunberg '05.
A. Mac Donald, '99, The Psychological Review, March.
Moczutkowski, '98, Nouv. Monographie de la Salpêtrière; zitiert nach Thunberg '05.
B. Naunyn, '89, Archiv f. experiment. Pathol. und Pharmakol. **25**, 272.
Philippe, '96, L'année psychologique; zitiert nach Thunberg '05.
A. Rollet, '99, Archiv f. d. ges. Physiol. **74**, 383.
O. Rosenbach, '84, Deutsche med. Wochenschr. **10**, Nr. 22.
— '89, Ebenda **15**, Nr. 13.
A. Stich (und Klaatsch), '59, Archiv f. pathol. Anat. u. Physiol. **17**, 80.
T. Thunberg, '01A, Skand. Archiv f. Physiol. **11**, 382.
— '01B, Ebenda **12**, 394.
— '05, Deutsche Zeitschr. f. Nervenheilk. **28**, 59.
W. Trotter und H. M. Davies, '09, The Journ. of Physiology **38**, 134.
Th. Vannod, '96, Revue méd. de la Suisse rom. 712.
— '97, Ebenda 21.
E. Veress, '02, Archiv f. d. ges. Physiol. **89**, 1.
Winkler, '07, Monatsh. f. prakt. Dermatol. **45**, 284.

IV. Bewegungs- und Lageempfindungen.

Methoden zur Untersuchung der Empfindungen aus den Bewegungsorganen.

1. Die Methoden der Gewichtsvergleichung.

Die Untersuchungen der sinnesphysiologischen Leistungen des menschlichen Bewegungsapparates haben Ausgang genommen von der Beobachtung E. H. Webers ('46, 546; '51, 87), daß die Unterscheidung von Gewichten wesentlich feiner ist, wenn sie von der Hand gehoben, nicht auf sie nieder-

gesetzt werden.*) Die Mitwirkung des Drucksinnes glaubte er im ersten Falle ausschließen zu können, indem er die Gewichte in Tücher legte und die zusammengeschlagenen Zipfel derselben von der Versuchsperson fest umgreifen ließ. Er schreibt den Erfolg dem „Gemeingefühl der Muskeln“ zu. Fechner hat bei seinen zahlreichen Hebungsversuchen auf eine Trennung der oberflächlichen und tiefen Empfindungen verzichtet, sich vielmehr durch gleichzeitige Inanspruchnahme beider dem natürlichen Verhalten bei Gewichtsvergleichungen möglichst anzunähern gesucht ('60, 183). Er benutzte mit Griff versehene Gefäße, in welche die erforderlichen Gewichte eingelegt wurden ('60, 96; '82, 359). Leyden ('69, 326) modifizierte die Einrichtung zur Untersuchung tabetischer Kranken so, daß die Hebung mit

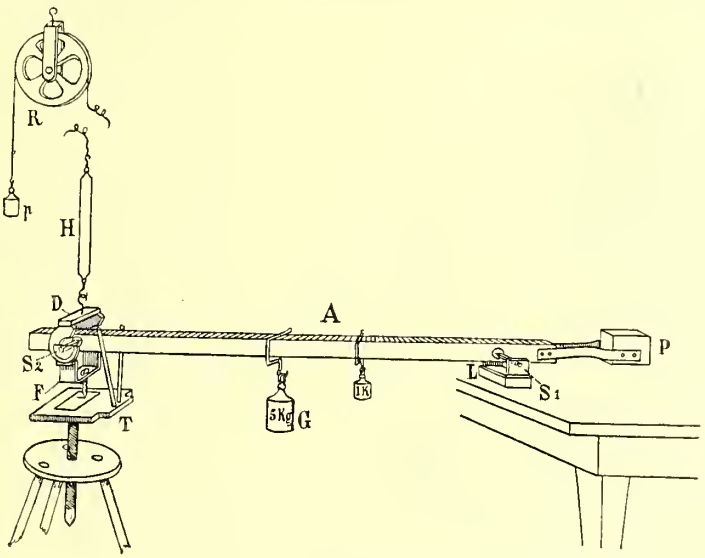


Fig. 29.

Jacobys Vorrichtung (Kraftwage) zur Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit für gehobene Gewichte.

dem Fußrücken geschehen konnte. Hering ('75, 342) legte die Gewichte auf einen mit Griff versehenen Pappteller, Hitzig ('88) stellte gleich große Kugeln von verschiedenem Gewicht her. G. E. Müller und Schumann ('89) verwendeten die Fechnersche Versuchseinrichtung, ersetzten aber die relativ langsamen Hebungen jenes Forschers durch ruckartig vor sich gehende. Sie waren dadurch imstande, den maßgebenden Einfluß aufzudecken, welchen die Einstellung auf einen Hebungsimpuls bestimmter Stärke auf die Schätzung der Gewichtsunterschiede ausübt. Die Verwertung der Ergebnisse geschah nach der Methode der r. und f. Fälle, die Bestimmung der Zeitfehler durch Wechsel in der Reihenfolge zwischen Grund- und Vergleichsgewicht. Derselbe ist für das Grundgewicht positiv, d. h. es besteht die Neigung, dasselbe kleiner zu schätzen, wenn es zuzweit, als wenn es zuerst gehoben wird. Das Webersche Gesetz wurde gültig be-

*) Besonders groß fand den Unterschied Charpentier ('91).

funden. Bloch ('90) suchte die Trennung der oberflächlichen von den tiefen Empfindungen teils wie Weber, teils dadurch zu erreichen, daß er das benutzte Glied (Finger) durch Umschnüren unempfindlich machte. Statt Gewichte zu heben, drückte er mit dem Finger auf den langen Arm einer Schnellwage in wechselndem Abstande von der Achse. Sunkel ('90) bediente sich der Hitzigschen Kugeln, während Waller ('91, '92) die Gewichtshebung durch Federspannung ersetzte. Auf die theoretische Bedeutung letzterer Modifikation hatten G. E. Müller und Schumann ('89, 63) hingewiesen.

Jacobj ('93) suchte die Hebung gleichmäßiger und die Urteile entsprechend sicherer zu gestalten, durch Verwendung eines ungleicharmigen, äquilibrierten Hebels, dem er durch reitende Gewichte veränderliche Drehungsmomente erteilte. Er bezeichnet die Einrichtung als Kraftwage (Fig. 29). Der Angriff der Hebevorrichtung H erfolgte durch ein auswechselbares auf Schneiden gelagertes Gehänge D am Ende des langen Hebelarmes; sie war verschieden gestaltet, je nachdem die Hebung mit der Hand, dem Kiefer oder der Zunge erfolgen sollte. Der Verfasser wurde durch seine Versuche, wie vor ihm Müller und Schumann, aufmerksam auf die Bedeutung, welche der Geschwindigkeit des Bewegungseintrittes für das Urteil der Versuchsperson zukommt. Er hat deshalb die Hebevorrichtung mit Kontakten versehen, durch welche sowohl der Beginn der Bewegung, wie der Augenblick der Abhebung der Last von der Unterstützung angezeigt, also so zu sagen die Latenzzeit gemessen wurde (Fig. 30). Wreschner ('98) hat die Methodik hauptsächlich dadurch zu verbessern gesucht, daß er den hebenden Unterarm möglichst reine Beugebewegungen ausführen ließ. Er hat ferner sein umfangreiches Versuchsmaterial einer sehr sorgfältigen Durcharbeitung unterzogen und dadurch Aufschlüsse gewonnen über die Art, wie das Urteil durch die Reihenfolge der Versuche (Zeitfehler) sowie durch die Übung beeinflußt wird. Der Einfluß der Geschwindigkeit der Gewichtsänderung auf die Wahrnehmung derselben ist von Seashore ('96) eingehend untersucht worden mit Einrichtungen, die anscheinend recht zweck-

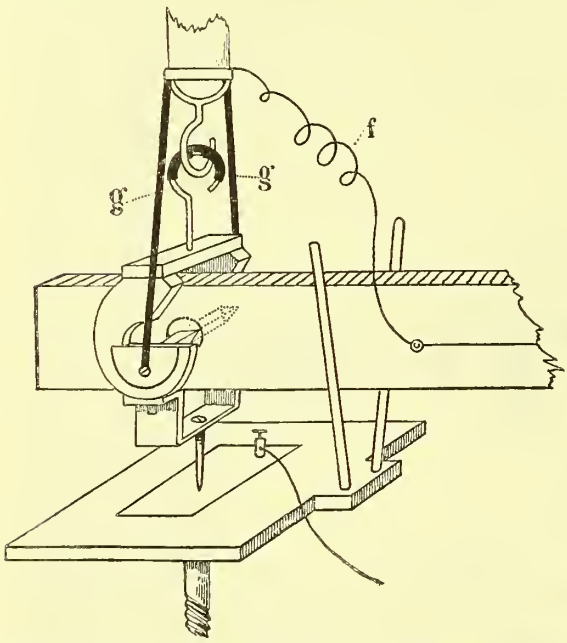


Fig. 30.
Einrichtung des Gebänges an der Jacobj'schen „Kraftwage" zur Bestimmung der Schnelligkeit der Hebung.

mäßig beschaffen, aber ohne Abbildungen so knapp beschrieben sind, daß die Bildung eines Urteils schwierig ist. Das Grundgewicht wurde bei unterstütztem Arm um eine sehr kleine Strecke (2 mm) gehoben, worauf die Änderung erfolgte, indem der Auftrieb des in Wasser schwimmenden Zusatzgewichtes mit wechselnder Geschwindigkeit vermindert wurde. Für plötzliche Gewichtsänderungen wurde die Äquilibrierung des an einem Wagebalken hängenden Zusatzgewichtes rasch entfernt.

Beobachtungen über die kleinsten Gewichte, deren Widerstand gegen eine vorgeschriebene Gelenkbewegung noch erkannt wird, und über die dabei auftretenden Empfindungsinhalte bei ungeschmälerter bezw. herabgesetzter Empfindlichkeit der oberflächlichen oder auch der tiefen Gewebsteile sind von Goldscheider ('89 B 146 ff., Ges. Abh. II 207 ff.) nach verschiedenen Verfahrungsarten mitgeteilt worden. Zu einer Bestimmung der Reizschwellen für die hieran beteiligten Sinneswerkzeuge sind die Versuche nicht geeignet; sie geben aber Anhaltspunkte, in welchem Maße die oberflächlichen und tiefen Gewebe an dem Erfolge beteiligt sind.

2. Die Empfindungsschwellen der Gelenkbewegungen.

Die Messung der kleinsten passiven Gelenkdrehung, die erkannt wird, scheint zuerst von Leyden ausgeführt worden zu sein. Er entzog das Glied der Einwirkung der Schwere, indem er es in eine passende Schwebe einhängte und fand die Schwelle bei $^1/_2$—1^0 für Gesunde ('69, 344). Eine sehr eingehende Untersuchung fand die Frage durch Goldscheider, der das Versuchsverfahren ganz bedeutend verfeinerte. Seine Einrichtungen waren je nach dem zu prüfenden Gliede etwas verschieden. Fingerglieder wurden nach Fixierung der Hand durch ein über eine Rolle wirkendes Gegengewicht in leicht flektierter Stellung äquilibriert, worauf durch Zugabe oder Wegnahme von Zusatzgewichten kleine Bewegungen hervorgerufen wurden (II 1, 5, 19, 100)[1]). Die Ausschläge wurden von einem Hebel vergrößert aufgezeichnet, wodurch auch eine Messung der zeitlichen Verhältnisse ermöglicht war. Zur Verringerung oder Aufhebung der Druckempfindung in der Haut wurde der Finger durch Gummi- und Metallhülsen fest umschnürt, vielfach außerdem noch faradisiert mit Wechselströmen, welche eben unter der Schmerzgrenze blieben. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, daß die zu untersuchenden Gelenke und deren Nerven von Stromschleifen möglichst frei bleiben, weil sonst eine starke Erhöhung der Bewegungsschwelle eintritt. Eines ähnlichen Verfahrens bediente sich Goldscheider, um die Schwelle für willkürliche Gelenkbewegungen zu ermitteln (II, 32). Zur passiven Bewegung des Handgelenks wurde das Verfahren hauptsächlich in 2 Richtungen abgeändert: erstens wurde das Glied nicht mehr durch Veränderung des Gegengewichtes, sondern durch einen Hebel bewegt, dessen Drehung durch Anschläge begrenzt waren (II, 101), und zweitens geschah die Übertragung der Bewegung unter Zwischenschaltung einer mit Wasser gefüllten Gummimanschette, deren Aufgabe es war, den Druck über eine große Hautfläche gleichmäßig zu verteilen (II, 118). End-

1) Diese und die folgenden Literaturangaben beziehen sich auf Goldscheiders Gesammelte Abhandlungen.

lich wurde die Bewegung der großen Gliederabschnitte auf hydraulischem Wege bewerkstelligt (II, 121). Die beobachteten Schwellenwerte sind an den distalen Gelenken der Glieder im allgemeinen größer als an den proximalen und an der oberen Extremität durchschnittlich kleiner als an der unteren. Die gefundenen Werte gelten für Winkelgeschwindigkeiten von 0,5—13° pro Sekunde. Man vgl. hierzu die Zusammenstellungen des Verfassers (II, 182, 290).

Während Goldscheider durch die Faradisierung eine Erhöhung der Schwellenwerte nur dann fand, wenn die Wechselströme durch das bewegte Gelenk gingen, hat Pillsbury ('01) die gleiche Erhöhung auch bei Faradisierung eines distalen Gelenkes beobachtet. Seine Normalwerte sind von

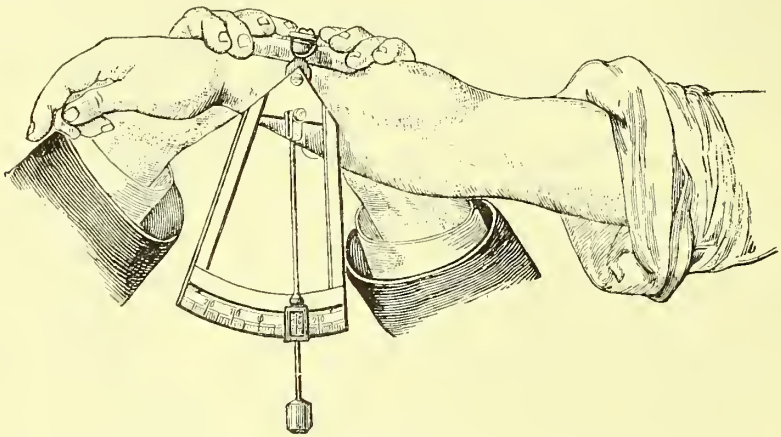


Fig. 31.
Klinometer zur Messung der Empfindungsschwelle für Gelenkbewegungen (Goldscheider).

der gleichen Größenordnung wie die Goldscheiders. Das untersuchte Glied ruhte auf einer drehbaren Schiene und wurde durch einen Elektromotor in Bewegung gesetzt. Spearman ('05) benutzte ein großes Rad mit einer seitlich verbreiterten Speiche, auf welche das Bein seines Patienten gelagert werden konnte. Bei einer Drehungsgeschwindigkeit von 1° pro Sekunde fand er auf der gesunden Seite Werte, welche denen von Goldscheider entsprechen, auch insofern, als sie für die proximalen Gelenke kleiner sind.

Nach M. Reichardt ('07), der indessen ausgedehntere Untersuchungen nicht ausgeführt zu haben scheint, ist die Bewegungsschwelle nicht so niedrig und auch nicht konstant. Er benutzte einen von C. Rieger angegebenen Apparat.

Für den praktischen Gebrauch hat Goldscheider ein Instrument nach Art eines Klinometers anfertigen lassen, welches auf das zu prüfende, horizontal gehaltene Glied aufgesetzt, die Winkeldrehung ablesen läßt, die von der Versuchsperson eben erkannt wird (II, 292), Fig. 31. Das Instrument ist im Falle sehr niedriger Schwellenwerte nicht immer ausreichend, vgl. Hocheisen ('93).

Der oben erwähnte Einfluß der Winkelgeschwindigkeit auf die Ebenmerklichkeit einer passiven Drehung ist verständlich, weil infolge der Trägheit des Gliedes jede Drehung um die (mit einer Hauptträgheitsachse nicht zusammenfallende) momentane Gelenkachse zu einer Druckwirkung im Gelenk führen muß, die um so größer ist, je rascher die Drehung geschieht. Als weiteres Beispiel für zum Bewußtsein kommende Druckänderungen im Gelenk kann die Widerstandsempfindung, insbesondere in ihrer sogenannten paradoxen Form gelten, die von Goldscheider in verschiedener Weise beobachtet worden ist (II, 90, 225, 233, 309, 323). Auf Erhöhung des Gelenkdruckes (d. h. des Druckes, den die Gelenkflächen aufeinander ausüben) sind vielleicht jene Bewegungsempfindungen zurückzuführen, die zwar beabsichtigt sind, aber aus äußeren Gründen nicht ausgeführt werden können. Man vgl. Sternberg ('85).

Über den Grad der Sicherheit und Genauigkeit, mit welchem gewisse vorgeschriebene Gliederlagen und Einstellungen bei wechselnder Unterstützung des Körpers und mit und ohne Beihilfe der Augen ausgeführt werden, hat Einthoven ('04) Bestimmungen mitgeteilt, die sich auf 8 Personen verschiedenen Alters erstrecken.

3. Unterschiedsschwelle für Bewegungen.

Bestimmungen dieser Größe liegen vor von M. Falk ('90), welcher unter Leitung Kraepelins arbeitete. Es wurde eine Armbewegung, welche die Versuchsperson auszuführen hatte, verglichen mit einer zweiten von etwas größerem oder kleinerem Umfange. Ein kleiner auf Schienen laufender Wagen diente dem Unterarm als Führung und die Größe der Ausweichung wurde durch einstellbare Anschläge bestimmt. Die Geschwindigkeit der Bewegung wurde nach dem Metronom geregelt. Zur Ermittlung des fraglichen Wertes der U. E. diente die Methode der r. und f. Fälle, die Methode der eben merklichen Unterschiede und eine aus beiden kombinierte Methode. Letztere ergab eine genügende Zahl von Gleichheitsurteilen, um den mittleren Fehler derselben berechnen zu können. Segsworth ('93) beschränkte die Bewegung auf ein Gelenk, dessen Ausschläge er registrierte. Die Unterschiedsschwelle wurde nach der Methode der Minimaländerungen bestimmt. Auch Kramer und Moskiewicz ('00, 112) haben nur Drehungen um ein Gelenk zugelassen, um die Versuchsbedingungen zu vereinfachen; an die Grund- oder Normalstrecke schloß sich die Vergleichsstrecke unmittelbar an. Sie fanden wie Falk innerhalb der gebräuchlichen Exkursionen des Gliedes ziemlich konstante Unterschiedsschwellen.

Eine sehr große Zahl von Untersuchungen ist der Frage gewidmet worden, mit welcher Genauigkeit eine vorgegebene oder auch willkürlich gewählte Bewegung durch dasselbe oder das symmetrische Glied reproduziert werden kann. So haben Bowditch und Southard ('81) einen vorher getasteten Punkt mit der gleichen oder anderen Hand wieder greifen, Hall und Hartwell ('84, 103) auf einem Maßstab mit den Zeigefingern beider Hände subjektiv gleiche Strecken von der Mitte aus abmessen lassen. Jastrow ('86, 541) hat vorgegebene Strecken mit der Hand abgreifen oder nachfahren lassen, die dann mit derselben Hand durch ähnliche Bewegungen

reproduziert werden mußten. A. M. Bloch ('90, '96) hat, wie schon vor ihm M. Blix ('84), symmetrische Punkte des Fühlraumes mit den beiden Händen gleichzeitig oder hintereinander aufsuchen oder bezeichnen lassen und hat den Einfluß verschiedener Versuchsbedingungen auf die Genauigkeit der Ortsbestimmung geprüft. In den Versuchen von E. B. Delabarre ('91, '92) sowie von Fullerton und Cattell ('92) war eine Fühlstrecke einer ersten vorgegebenen gleich, größer oder kleiner zu machen, während Woodworth ('99) die Versuchsperson einer vorgegebenen Linie eine gleiche nachzeichnen ließ. Die Zeichnung geschah unter verschiedenen Versuchsbedingungen auf dem abrollenden Papier eines Uhrwerks. Angier ('05) hat unter Nagels Leitung zwei Fühlstrecken verglichen, von denen die eine unveränderlich war, während die andere in kleinen Schritten verändert wurde. Er hat die Bewegung möglichst auf einfache Drehung im Ellbogengelenk beschränkt und außerdem verschiedene Modifikationen geprüft, wie den Wechsel zwischen passiver und aktiver Durchmessung der Fühlstrecke, zwischen langsamer und rascher Bewegung u. a. Der Einfluß einseitigen Zuges auf das tastende Glied ist vor Angier von Bloch ('90), Kramer und Moskiewicz ('00) u. a. untersucht und wenig oder gar nicht wirksam gefunden worden.

Zu wiederholten Untersuchungen hat eine hierhergehörige Beobachtung von J. Loeb ('87) Veranlassung gegeben. Er ließ zum Teil in Verbindung mit M. Cremer ('87) auf einem frontal zur Versuchsperson gespannten Faden bei gleichzeitiger symmetrischer oder auch gleichsinniger Bewegung beider Hände subjektiv gleiche Strecken abmessen. Hierbei sowie bei sukzessiver Abmessung zweier gleicher Strecken durch eine Hand waren fast ausnahmslos die beiden Strecken sehr verschieden groß, doch konnte Loeb feststellen, daß die ungleichen Strecken in nahezu gleicher Zeit durchmessen wurden. In einer zweiten Abhandlung berichtet Loeb ('90) über weitere, zum Teil mit Ostermann ('88) ausgeführte Beobachtungen, in denen die objektive oder geometrische Ungleichheit der subjektiv gleichen Strecken in ihrer Abhängigkeit von dem Verkürzungsgrad der tätigen Muskeln, mit anderen Worten, von der Gliederstellung von dem Grade der Aufmerksamkeit sowie von äußeren Reibungswiderständen untersucht wurde.

Kramer und Moskiewicz ('00) haben im Laboratorium von Ebbinghaus die Bedingungen für die Richtung und Größe der Ungleichheit schärfer herausgearbeitet. Sie fanden einseitigen Zug auf das reproduzierende Glied, d. h. Veränderung der Mukelspannungen, ohne Belang, von wesentlichem Einfluß dagegen die Bequemlichkeit der Ausgangslage. Die Versuche bestanden in der symmetrischen Reproduktion gegebener Gliederlagen, einmalig oder alternierend zwischen rechts und links oder in der wiederholten Reproduktion einer Lage durch stets dasselbe Glied. Versuche mit einfacher Winkeldrehung in einem Gelenk gaben gleiche Resultate wie komplizierte Bewegungen.

E. Jaensch ('06) hat dann in demselben Laboratorium die Versuche weitergeführt, indem er durch eine pneumatische Registrierung die Dauer der Bewegungen aufschrieb. Er fand, daß die subjektiv für gleich gehaltenen Strecken, trotz erheblichen objektiven Längenunterschiedes, in merklich derselben Zeit durchlaufen werden. Die Wichtigkeit dieses psychischen

Meßverfahrens für das Urteil der Versuchsperson kommt auch in der anschließenden Abhandlung desselben Verfahrens (Über Täuschungen des Tastsinns '06) zum Ausdruck.

4. Die Wahrnehmung der Gliederlage.

Wie die Reproduktion einer vorgegebenen Strecke um so ungenauer wird, je mehr dieselbe nach den Seitenteilen des bequemen Arbeitsfeldes verschoben wird, so ist auch die Beurteilung der Gliederlage eine um so unvollkommenere, je mehr sie von der bequemen Körperhaltung abweicht. Delage ('88, 18) ließ den Kopf um die vertikale Achse stark seitwärts drehen und dann (bei verbundenen Augen) die scheinbare Richtung der Sagittalen durch einen Stab anzeigen. Er stellte fest, daß die Kopfdrehung stets unterschätzt wurde. Die zahlreichen Versuche von Mach, Delage, Aubert u. a. über die Orientierung des Körpers im Raume müssen hier übergangen werden, da es sich bei denselben um Leistungen des Vestibularapparates handelt. Sachs und Meller ('03) schnallten die Versuchsperson auf ein Brett, das um eine sagittale Achse drehbar war und den Körper in beliebige Seitenneigung zu bringen erlaubte. Der Kopf, durch ein Beißbrett fixiert, wurde aufrecht gestellt und ihm gegenüber, in bequemer Greifweite, ein Stab, der ebenfalls um eine sagittale Achse drehbar war. Die Versuchsperson hatte bei geschlossenen Augen den Stab so einzustellen, daß er mit der scheinbaren Vertikalen, der scheinbaren Kopf- und Körperlage übereinstimmte. Neben anderen Ergebnissen fand sich, daß der Winkel zwischen Kopf und Rumpf stets unterschätzt wurde.

Eine sehr eingehende Studie hat der Frage Spearman ('06) gewidmet. Die Versuchsperson saß vor einem Tisch von Brusthöhe, auf welchem der zu reizende linke Arm ruhte. Die Stellung desselben wechselte von äußerster Abduktion bis zu möglichster Annäherung an die Brust. Die Beibehaltung der gewählten Lage wurde durch eine passende Gipsform gesichert. Dicht oberhalb des Armes befand sich die aus einer Blechscheibe bestehende Registrierfläche, auf welcher die Versuchsperson teils ohne, teils mit Unterstützung durch die Augen den Punkt anzugeben hatte, der nach ihrer Meinung der gereizten Hautstelle entsprach. Die Versuche ergaben, daß der konstante Fehler für eine gewisse mittlere Stellung des Arms ein Minimum werden und um so mehr wachsen, je weiter sich der Arm aus derselben entfernt. Das Vorzeichen des Fehlers lehrt, daß die Abweichung des Arms von der Mittelstellung stets unterschätzt wird. Wird die Lokalisation mit Unterstützung der Augen ausgeführt, so kommt noch ein weiterer Lokalisationsfehler hinzu, der von der Kopfdrehung herrührt.

5. Anatomische und physiologische Untersuchungsmethoden.

Der Nachweis rezeptorischer Nerven in den Bewegungsapparaten kann auch auf objektivem Wege geführt werden, sei es anatomisch oder experimentell. Auf die histologischen Methoden zur Darstellung der Nervenenden in den Knochen, dem Periost, den Muskeln, Sehnen und Aponeurosen kann hier nicht näher eingegangen werden. Eine gute Zusammenstellung der anatomischen Literatur über diese Nervenenden gibt Sherrington in Schäfers Textbook of Physiology 1900, **2**, 1006. Die rezeptorische Natur

der Muskelbündel ist von Sherrington durch Degenerationsversuche nachgewiesen ('95). Auf experimentellem Wege ist die Anwesenheit rezeptorischer Nerven in den genannten Geweben von mehreren Forschern sichergestellt worden. Goldscheider (II, 282) erhielt durch mechanische und thermische Reizung der Gelenkenden Änderungen der Atemtätigkeit, Sternberg ('90) durch Erschütterung des Knochens Reflexwirkungen auf die Muskeln. Die eingehendsten und wichtigsten Untersuchungen hierüber verdankt man Sherrington (vergl. dessen zusammenfassende Darstellung ('06) insbesondere dessen Ausführungen über das propriozeptive System, S. 129 ff.). Es ist indessen unbekannt, wenn nicht gar zweifelhaft, ob die Erregung dieser für die Ordnung der Reflexe so überaus wichtigen Nerven mit Vorgängen im Bewußtsein verknüpft ist.

Literatur.

R. P. Angier, '05, Zeitschr. f. Psychol. **39**, 429.
A. Blecher, '93, Diss. Berlin.
M. Blix, '84, Upsala läkareförenings förhandl. **19**, 123.
A. M. Bloch, '90, Revue scientif. **45**, Nr. 10, 294.
—— '96, Compt. rend. Soc. de Biol. 25 janvier 1896, 81.
H. P. Bowditch und W. F. Southard, **81**, Journ. of Physiol. **3**, 232.
A. Charpentier, '81, Arch. de physiol. norm. et path. 122.
M. Cremer, '87, Diss. Würzburg.
E. B. Dellabarre, '91, Diss. Freiburg i/B.
—— '92, Mind 17, 379.
J. Delage, '86, Arch. de Zoologie expér. 2me Série **4**, 535; übersetzt von H. Aubert, Tübingen 1888.
W. Einthoven '04, Arch. internat. de physiol. **1**, 72.
M. Falk, '90, Diss. Dorpat.
G. Th. Fechner, '60, Elemente der Psychophysik I, Leipzig.
—— '82, Revision der Hauptpunkte der Psychophysik, Leipzig.
G. S. Fullerton und J. Mc Keen Cattell, '92, On the Perception of small Differences, Philadelphia.
A. Goldscheider, '87A, Zentralbl. f. Physiol., **1**, 223; Ges. Abh. II 1.
—— '87 B, Arch. f. Physiol. 483; Ges. Abh. II 4.
—— '88, Zeitschr. f. klin. Med. **15**, 82; Ges. Abh. II, 9.
—— '89 A Zentralbl. f. Physiol. **3**, 90; Ges. Abh. II 90.
—— '89 B Arch. f. Physiol. 369, 540, Suppl. 141; Ges. Abh. II 92, 97, 201.
—— '90 A, Ebenda, 380; Ges. Abh. II 282.
—— '90 B Berl. klin. Wochenschr. Nr. 14, 46; Ges. Abh. II 288, 296.
—— '90 C Zeitschr. f. Psychol. **1**, 145, (Autoreferat).
A. Goldscheider und A. Blecher, '95, Arch. f. Physiol. 536; Goldscheider, Ges. Abh. II 309.
G. S. Hall und E. M. Hartwell' 84, Mind **9**, 93.
E. Hering, '75, Sitzber. d. Wien. Akad., math.-naturw. Klasse, III. Abt., **72**, 342.
Hitzig, '88, Neurol. Zentralbl. **7**, Nr. 9 und 10.
P. Hocheisen, **93**, Zeitschr. f. Psych. **5**, 239.
C. Jacobj, '93, Arch. f. exp. Path. und Pharm. **32**, 49.
E. Jaensch, '05, Zeitschr. f. Psych. **41**, 257, 280 und 382.
J. Jastrow, '86, Mind **11**, 539.
F. Kramer und Moskiewicz, '00, Zeitschr. f. Psych. **25**, 101.
E. Leyden, '69, Arch. f. path. Anat. **47**, 321.
J. Loeb, '87, Arch. f. d. ges. Physiol. **41**, 107.
—— '90, Ebenda, **46**, 1.
G. E. Müller und Fr. Schumann, '89, Arch. f. d. ges. Physiol. **45**, 37.

H. Ostermann, '88, Diss. Würzburg.
W. B. Pillsbury, '01, Americ. Journ. of Psychol. **12**, 346.
M. Reichardt, '07, Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **41**, 430.
M. Sachs und J. Meller, '03, Zeitschr. f. Psych. **31**, 89.
C. E. Seashore, '96, Studies from the Yale Psychol. Laborat. **4**, 41.
Segsworth, '93 vgl. Wundt, Physiol. Psychol. **4**. Aufl. I. 429.
C. S. Sherrington, '95, Journ. of Physiology **17**, 215.
—— '06, The integrative action of the nervous system, London.
C. Spearman, '05, Journ. of Psychol. **1**, 286.
—— '06, (Wundt) Psychol. Studien, **1**, 388.
M. Sternberg, '85, Arch. f. d. ges. Physiol. **37**, 1.
—— '90, Kongr. f. inn. Med. **9**, 428.
—— '93, Die Sehnenreflexe, Wien.
R. Sunkel, '90, Inaug.-Diss. Marburg.
A. D. Waller, '91, Brain Nr. 54 und 55, 179, 432.
—— '92. Proc. Physiol. Soc., Journ. of Physiol. **13**.
E. H. Weber, '46, Der Tastsinn und das Gemeingefühl in R. Wagners Handwörterbuch der Physiologie, 3. Bd. 2. Abt. Braunschweig.
—— '51, Derselbe Artikel in besonderem Abdruck.
R. S. Woodworth, '99, Psychol. Review, Monograph. Suppl. Nr. 13, 1—106.
A. Wreschner, '98, Schriften der Ges. f. psychol. Forschung, 3. Sammlung Heft 11. Leipzig.

II.

Geruch und Geschmack

von

H. Zwaardemaker in Utrecht.

(Mit 18 Figuren.)

I. Die Riechstoffe.

Wir können die Riechstoffe definieren als chemisch reine Substanzen, welche, wie G. Cohn es ausdrückt, „auch durch den Geruchssinn wahrnehmbar sind.“ Hält man an dieser, auch von den anderen neueren Autoren[1]) gegebenen Definition fest, so darf die Physiologie für ihre Versuche sich nur ausnahmsweise der Naturprodukte bedienen, denn die natürlich vorkommenden Riechstoffe sind meistens Gemische[2]) von zum Teil riechenden, zum Teil nicht riechenden Substanzen. Aber auch abgesehen von diesem formellen Grund, werden wir uns im Interesse der Untersuchung selbst zu bestreben haben, wo irgend möglich, mit chemisch genau umschriebenen Substanzen zu arbeiten. Vor 10 Jahren[3]) war dies nur in sehr beschränktem Maße möglich. Ich habe dann auch das Prinzip, nur mit reinen Stoffen zu arbeiten, in meiner Physiologie des Geruchs[4]) nicht durchführen können, will jetzt jedoch versuchen, ihm in diesem Handbuch gerecht zu werden und ausschließlich Angaben über chemisch definierte Riechstoffe oder genau bekannte Lösungen dieser Substanzen zu machen.

Methodologisch wichtige Eigenschaften.

Die Riechstoffe besitzen im allgemeinen einige Eigenschaften, die wir hier, weil sie für die Technik der Versuche wichtig sind, kurz aufzählen wollen.

a) Eine selten große, meistens mäßige oder geringe Flüchtigkeit bei gewöhnlicher Temperatur.

Nicht so sehr über die Eigenschaft selbst werden wir uns zu verbreiten haben, denn sie ist für jeden, der die korpuskuläre Natur der Gemische anerkannt, selbstverständlich, als über die Art und Weise, auf welche sie bestimmt werden kann.

---

1) J. M. Klimont, Die synthetischen und isolierten Aromata. Leipzig 1899. E. Erdmann, Zeitschr. f. angewandte Chemie 1900, Heft 5, S. 103. G. Cohn, Die Riechstoffe (aus Bolley-Englers Handb. d. chem. Technologie). Braunschweig 1904.

2) J. Ch. Sawer, Odorigraphia. London 1892/4, 2 vol.

3) Die hier vorliegende Bearbeitung der technischen Olfaktologie hat ursprünglich 1905 stattgefunden, ist jetzt, März 1910, von mir revidiert und mit einigen Zuschriften vervollständigt.

4) H. Zwaardemaker, Die Physiologie des Geruchs. Leipzig 1895.

Die Flüchtigkeit eines in einem Versuche zur Anwendung kommenden Riechstoffs ist in drei Fällen scharf bestimmbar.

1. Wenn der Riechstoff in vollkommen reinem Zustande ohne Beimischung irgendeiner anderen Substanz benutzt wird. Die Wägung mittels analytischer Wage, resp. Mikrowage, ergibt dann, in Verbindung mit einem Chronometer (Rennuhr), ohne weiteres die Lösung des Problems.

2. Wenn die moderne physikalische Chemie den Riechstoff bereits im heterogenen Gleichgewicht mit einem anderen — an sich nicht riechenden — Stoff untersucht hat und also eine genau definierte Mischung vorliegt. Die Anzahl der Stoffe, für welche die Phasenlehre die Gleichgewichte zwischen einer flüchtigen und einer gasförmigen Phase oder zwischen einer festen und einer gasförmigen Phase studiert hat, ist leider noch außerordentlich gering. Beispielsweise wollen wir hier auf das Gemisch Wasser-Äther[1]) hinweisen. In diesen Fällen tritt die Bedeutung der Temperatur ungemein klar hervor, so daß sich die Notwendigkeit ergibt, in allen Riechversuchen, wobei es sich um die Verdunstung eines Riechstoffs aus einer Lösung handelt, die Temperatur genau zu beachten und zu verzeichnen.

3. Wenn ein Riechstoff in einem nicht flüchtigen Lösungsmittel aufgenommen ist. Solcher geruchlosen (s. unten S. 53) Lösungsmittel gibt es nur wenige: Paraffinum liquidum, Glycerinum, Myristinsäure (eine feste Fettsäure) und endlich Öl. Von diesen ist nur das Paraffinum liquidum und das Glyzerin bequem geruchlos zu erhalten. Sowohl die Myristinsäure als das Öl nehmen sehr leicht Gerüche, mit denen sie zufällig in Berührung gekommen, an und sind dann davon ohne umständliche Prozeduren nicht zu befreien. Obgleich die Verdampfung eines Riechstoffs aus diesen Substanzen gewöhnlich sehr langsam vor sich geht, ist die Gewichtsverringerung des Ganzen unter Umständen sehr wohl einer Wägung zugänglich, und in diesen Fällen führt dies unmittelbar zur Feststellung der Verdampfungsgeschwindigkeit.[2])

Beispielsweise sei hier die Verdampfungsgeschwindigkeit einiger Stoffe aus paraffinöser Lösung mitgeteilt und zwar nach in meinem Laboratorium von J. Hermanides vorgenommenen Messungen. Es verdampfte pro Minute und pro cm² (Mittelwert über die erste Viertelstunde des Verdampfens aus offener Schale):

von	Äthylbisulfid	aus	0,1 ‰	Lösung	$14 \cdot 10^{-8}$ Gramm
„	Guajakol	„	1 ‰	„	$5 \cdot 10^{-7}$ „
„	Isoamylazetat	„	0,5 %	„	$36 \cdot 10^{-7}$ „
„	Nitrobenzol	„	5 %	„	$92 \cdot 10^{-7}$ „
„	Pyridin	„	1 %	„	$93 \cdot 10^{-8}$ „
„	Skatol	„	1 ‰	„	$185 \cdot 10^{-9}$ „
„	Terpineol	„	2,5 ‰	„	$75 \cdot 10^{-7}$ „
„	Valeriansäure	„	0,1 ‰	„	$28 \cdot 10^{-8}$ „

b) Ein meistens im gasförmigen Zustande nicht sehr großes Diffusionsvermögen.

Die Diffusionsgeschwindigkeit verschiedener Riechstoffe nach ihrer Verflüchtigung in der Luft ist außerordentlich verschieden. Der Ätherduft verbreitet sich verhältnismäßig rasch. In der Nähe der Riechquelle braucht der Konvektionsstrom des Aether aceticus, der von einer Verdampfungsfläche entweicht, kaum eine Sekunde, um auf 10 cm merkbar zu werden. Eugenol hingegen braucht hierzu 15 Sekunden. Diese Verhältnisse lassen sich am leichtesten unter Verwendung später zu beschreibender Riechkasten genau feststellen. Physikalisch vollkommen befriedigend wird der Versuch jedoch nur für die wenigen Riechstoffe, deren Verdampfungsgeschwindigkeit an der Quelle und deren Konzentration am Beobachtungsorte bekannt sind.

Die Diffusionsgeschwindigkeit eines Riechstoffs spielt physiologisch eine große Rolle. In den Versuchen hat man ihr als einem mehr oder weniger störenden Faktor Rechnung zu tragen.

---

1) Konowalow, Wiedemanns Annalen. Neue Folge, Bd. 14, S. 23.

2) Ch. Henry hat 1891 einen auf den Areometerprinzip begründeten Verdampfungsmesser angegeben, der für die alkoholischen Lösungen der Parfümerieindustrie geeignet ist, in der Physiologie vorläufig schwerlich Verwendung finden kann.

c) Eine manchmal bedeutende Adsorption an die Wände und Gegenstände des Zimmers und an die Teile und Apparate, womit der Riechstoff in gasförmigem Zustande in Berührung kommt.

Die Adsorption eines Riechgases, welcher man bei den Riechversuchen fortwährend begegnet, scheint hauptsächlich in der Kapillarschicht von verdichtetem Wasserdampf und Luft stattzufinden, die die Oberfläche aller Gegenstände fortwährend bekleidet, denn wenn man die Oberfläche sorgfältig mit verdünntem Alkohol reinigt, mit Watte abreibt, und außerdem die Gegenstände erwärmt, ist die Adsorption der Riechgase bedeutend geringer. Vereinzelt möge die Substanz des Gegenstandes selbst jedoch auch noch Riechgase an sich ziehen. Das Ionon z. B. haftet ungemein fest an mit Wachs eingeriebenen Holzflächen. Manchmal adhäriert das adsorbierte Riechgas so fest an den Wänden der Apparate, daß letztere durch gewöhnliche Reinigung und Wattetrocknung davon nicht befreit werden können und man andere Kunstgriffe zu Hilfe nehmen muß. Für Glaswände, die mit Vanillindampf in Berührung gewesen sind, hat sich das Abwischen mit einer Natriumbisulfitlösung bewährt. In manchen anderen Fällen benutzen wir im Laboratorium trockne Kreide[1]), womit zumal große Flächen sich bequem und rasch von adsorbierten Gerüchen befreien lassen. Ein souveränes Mittel, das bei Gegenständen aus Glas und Metall außerordentlich zweckentsprechend ist, ist die Abspülung mit feinem, trocknem Sande.

In der Tabelle S. 49 sind die Ergebnisse einiger Untersuchungen mitgeteilt, welche in meinem Institut teils von J. Hermanides, teils von mir selbst ausgeführt worden sind. Die Messungen geschahen in der Weise, daß ein mit gemessener Duftmenge geschwängerter Luftstrom während 5 Minuten mit einer Geschwindigkeit von 100 ccm pro Sekunde durch aus verschiedenen Materialien angefertigte Röhren von 10 cm Länge und 0,8 cm Weite geführt wurde. Die Tabelle enthält Angaben über die Zeit, während welcher die Röhren, nachdem die Strömung unterbrochen und die Geruchsquelle entfernt worden war, den Adsorptionsgeruch beibehielten.

d) Die Verschiedenheit des Duftes, die einige Riechstoffe in verschiedenen Konzentrationen darbieten.

Es ist eine bemerkenswerte Tatsache, daß manche Riechstoffe in verschiedenen Verdünnungen qualitativ äußerst verschiedene Gerüche von sich geben. Das konzentrierte Ionon riecht krautartig, das reichlich verdünnte hat einen angenehmen Veilchenduft. Das konzentrierte Anethol riecht nach verdünntem Spiritus, das reichlich verdünnte ist der Träger des Anisgeruchs. Das konzentrierte Vanillin riecht nach altem Papier, das reichlich verdünnte hat den Vanillecharakter. Sehr schön tritt die Erscheinung auch zutage beim Antranilsäuremethylester. Der Geruch ist konzentriert scharf und unangenehm, verdünnt erinnert es an Orangeblüten. Die Eigenschaft, qualitativ und infolgedessen auch quantitativ verschieden zu riechen, je nachdem man die Düfte im konzentrierten oder verdünnten Zustande dem Geruchsorgan zuführt, kommt in ausgesprochenem Maße nur ganz wenigen reinen Gerüchen zu.[2]) Bei Mischungen können sukzessive Verdünnungen mannigfache Folgen haben. In der physiologischen Versuchstechnik hat man sowohl die aus ihrer Eigenart variablen Gerüche als auch die durch Mischung wechselnd gefärbten zu vermeiden.

e) Ein mittelhohes Molekulargewicht.

Wie G. Cohn bemerkt, sind die Riechstoffe im Vergleich zu den Farbstoffen verhältnismäßig einfache Körper. Den hochmolekularen Verbindungen geht der Geruch ab. Ferner üben die allereinfachst gebauten Verbindungen keine Geruchswirkung aus.

f) Das Vorkommen von bestimmten odoriphoren Atomgruppen im Molekularbau.

---

1) J. de Groot, Zeitschr. f. wissensch. Mikrosk., Bd. 15, S. 62.

2) J. Paßy hat (Soc. de Biol., 5. Nozbr. 1892) für solche Fälle die Hypothese aufgestellt, daß der betreffenden Substanz (als Beispiel führt er tertiären Amylalkohol an) ein zusammengesetzter Geruch zukomme; in einem solchen Komplex sollten die Komponenten im konzentrierten Zustand sich gegenseitig verdecken, bei Verdünnungen die eine unmerklich und so die übrig bleibende vorherrschend werden.

Adsorptionsdauer.

	Äthyl-bisulfid	Guajakol	Ionon	Isoamyl-azetat	Muscon	Nitro-benzol	Pyridin	Skatol	Terpineol	Valerian-Säure
Glas	wenige Sek.	1 Min.	wenige Sek.	0	1 Tag	wenige Sek.	0	1½ Stund.	0	30 Min.
Nickel	wenige Sek.	5 Min.	2 Tage	wenige Sek.	4–9 Tage	wenige Sek.	wenige Sek.	3½ Tage	0	wenige Sek.
Silber	wenige Sek.	0	wenige Sek.	0	2 Tage	wenige Sek.	0	1 Tag	wenige Sek.	5 Min.
Gold	wenige Sek.	12 Min.	—	0	2 Tage	wenige Sek.	0	1½ Tage	0	wenige Sek.
Aluminium	1 Min.	15 Min.	2½ Tage	0	1 Tag	wenige Sek.	0	9 Tage	0	3 Min.
Stahl	wenige Sek.	7 Min.	4 Tage	2 Min.	wenige Sek.	wenige Sek.	30 Min.	20 Tage	4 Min.	0
Eisen	wenige Sek.	8 Min.	4 Tage	wenige Sek.	wenige Min.	wenige Sek.	45 Min.	10 Tage	wenige Sek.	0
Kupfer	wenige Sek.	3 Min.	2 Tage	0	4 Tage	wenige Sek.	2 Min.	3 Tage	wenige Sek.	0
Zink	wenige Sek.	25 Min.	—	wenige Sek.	3 Tage	wenige Sek.	2½ Min.	14 Tage	0	0
Blei	1 Min.	wenige Sek.	1 Tag	0	12 Tage	wenige Sek.	wenige Sek.	10 Tage	0	0
Zinn	wenige Sek.	8 Min.	einige Min.	0	4 Tage	wenige Sek.	½ Min.	7 Tage	0	2 Min.
Porzellan	2 Min.	5 Min.	wenige Sek.	15 Min.	wenige Sek.	8 Min.	5 Min.	0	5 Min.	0

Daß der Geruch eine konstitutive Eigenschaft der Moleküle ist, geht aus den Ausführungen Haycrafts[1]), Rupes[2]) und G. Cohns[3]) klar hervor. Wie mir scheint, sind das eine Mal intraatomistische Verhältnisse, das andere Mal intramolekulare Beziehungen für den Geruch bestimmend.[4]) Ersteres trifft zu für Verbindungen, in welchen die Elemente Arsen, Schwefel, Tellur, Brom und Jod vertreten sind, das zweite für die zahlreichen Verbindungen der organischen Chemie, in welchen man die geruchsbestimmenden Atomengruppen: Ester-, Aldehyd-, Keton-, Karboxyl-, Nitril-, Nitro- und die Azimidogruppe[5]) antrifft. Wiewohl das Molekül wahrscheinlich als ein Ganzes bis in das Riechorgan eindringt, scheinen es doch im allgemeinen bestimmte Teile desselben zu sein, die für den Reiz ausschlaggebend sind.

g) Die in manchen Hinsichten bestehende Analogie mit den Emanationen der radioaktiven Substanzen.

Die Übereinstimmung zwischen den Riechstoffen einerseits und den Emanationen radioaktiver Substanzen andererseits ist schon mehrfach aufgefallen. Unter den Riechstoffen begegnet man einer Anzahl, die, obgleich sie fortwährend duften, fast nicht an Gewicht verlieren. Sowohl die Düfte als die Emanationen veranlassen Adsorptionen und sekundäre Wirkungen. Sowohl der adsorbierte Geruch als die adsorbierte Emanation ist nach einiger Zeit spurlos verschwunden. Fügt man noch den Einfluß der Feuchtigkeit hinzu, so erhält man bereits eine stattliche Reihe Übereinstimmungen. Ihnen gegenüber stehen jedoch eine Reihe Differenzen. Die wichtigsten von diesen sind die den Riechstoffen fehlende elektrische Ladung[6]) und ihre Unwirksamkeit auf die lichtempfindliche Platte.

Klassifikation der Riechstoffe.

In den Kreisen der Nichtphysiologen begegnet man jetzt dem Bestreben, die Riechstoffe ausschließlich nach chemischen Prinzipien einzuteilen. Für Magazine und Kollektionen empfiehlt sich dieses Vorgehen entschieden und ich möchte den Vorstehern von Instituten anraten, die olfaktologische Sammlung chemisch einteilen zu lassen. Nach diesem Gesichtspunkte wird sie auch jemand in Ordnung halten können, der dem Gebiete der Geruchsphysiologie fern steht, und man wird nie in die Verlegenheit darüber kommen, wo ein neu erworbener Riechstoff einzuteilen sei. Eine geeignete, dabei innezuhaltende Reihenfolge ist die G. Cohns[7]), die für physiologische Sammlungen jedoch noch eine Vervollständigung erfordert, wie wir sie hier Erdmann und Klimont entnehmen.

a Kohlenwasserstoffe.
b Alkohole.
c Azetalen.
d Äther.
e Ester.

---

1) J. B. Haycraft, Brain 1888, S. 166. Die Haycraftschen Reihen zeigen keine Ähnlichkeiten, sondern gleichmäßige Übergänge.

2) H. Rupe, Ber. d. d. chem. Gesellsch., Bd. 33, S. 3401.

3) G. Cohn, Riechstoffe. S. 181.

4) H. Zwaardemaker, Akad. d. Wissensch. Amst., Proc. 25, Juni 1904, S. 152.

5) Die geruchsbestimmenden Atomengruppen wurden von mir Odoriphoren genannt und in meiner Physiologie des Geruchs S. 247 angeführt. Später nannten Klimont sie Aromatophorengruppen, Rupe und Majewski Osmophoren. Vergl. Majewski, Inauguraldiss. Basel 1898.

6) Bis jetzt begegnete ich, mit einem Exnerschen Elektroskop prüfend, keiner nennenswerten Ionisation (Methodologisches bei Stark, Die Elektrizität in Gasen, Leipzig 1902, S. 51).

7) G. Cohn, Die Riechstoffe, Braunschweig 1904.

f Laktonen.
g Aldehyde.
h Ketone.
i Phenole und Phenoläther.
j Nitroverbindungen.
k Basen.
l Säuren.
m Schwefelverbindungen.
n Arsenverbindungen.

Für den Versuch aber kann die chemische Klassifikation nicht zur Richtsehnur dienen, denn es ist klar, daß nicht die Konstitution, sondern die Wirkungen der Konstitution auf den menschlichen und tierischen Körper, hier das Ausschlaggebende werden. Die Wirkungen hängen sinnesphysiologisch in erster Linie von der Qualität des Geruchs ab, und wir bedürfen daher einer Einteilung der Riechstoffe nach den Qualitäten der von ihnen hervorgerufenen Empfindungen. Eine solche findet man bei Linnaeus. In meiner Physiologie des Geruchs habe ich sie den modernen Anforderungen anzupassen versucht. Sie läßt sich durchführen für die rein olfaktiven, wie für die scharfen und schmeckenden Riechstoffe.

Tabelle der chemisch einheitlichen, rein olfaktiven Riechstoffe.[1])
NB. Die kleinen Buchstaben zwischen Klammern beziehen sich auf die chemische Einteilung (siehe die unmittelbar vorhergehende Tabelle).

1. Klasse. Ätherische Gerüche (odores aetherici Lorry).
Essigsäureäthylester (e).
Essigsäureisoamylester, riecht birnenähnlich (e).
Buttersäuremethylester, riecht nach Reinetten (e).
Buttersäureäthylester, riecht nach Ananas (e).
Isovaleriansäureäthylester, riecht nach Obst (e).
Capronsäureäthylester, riecht ananasähnlich (e).
Caprylsäureäthylester, riecht ananasähnlich (e).
Benzylazetat, riecht nach Birnen (e).
Methylheptenon, riecht wie Amylazetat (h).
Azeton, riecht obstähnlich (h).
Menthonylaldehyd (g).
Äthyläther, riecht ätherisch (d).
Butyläther, riecht ätherisch (d).
Chloroform, riecht ätherisch.

2. Klasse. Aromatische Gerüche (odores aromatici L.)
a) Kampfergerüche.
Kampfer, Träger des Kampfergeruchs (h).
Borneol, dem Kampfer täuschend ähnlich (b).
Fenchon, riecht wie Kampfer (h).
Borneolazetat, Geruchsträger aller Koniferenöle (e).
Eukalyptol, siehe Cineol, riecht nach Cajaputöl (d).
b) Gewürzartige Gerüche.
Zimtaldehyd, Träger des Zimtgeruchs (g).
Eugenol, Träger des Nelkenölgeruchs (i).

1) Für die jeden gesonderten Körper betreffende, chemische Literatur siehe: Index phytochemicus, Systematische Übersicht aller Pflanzenkörper, nach dem Kohlestoffgehalt geordnet. Mit Angabe der Formel, der Nebennamen, der prozentischen Zusammensetzung, des Molekulargewichts, des Schmelz- und Siedepunktes, sowie der Literatur, bearbeitet von Greshoff, Ritsema, Sack. Haarlem Kolonialmuseum 1905.

c) Anisthymiangerüche.
Safrol, erinnert sowohl an Kümmel als an Eugenol (i).
Carvon, Träger des Kümmelgeruchs (h).
Salizylsäuremethylester, riecht nach Gaultheriaöl (e).
Methylnonylketon, Träger des Rautenölgeruchs (h).
Carvänol, riecht wie Thymian (i).
Thymol, riecht wie Thymian (i).
Menthol, hat starken Pfefferminzgeruch (b).
Apiol, Träger des Geruchs des Petersiliensamenöls (i).
Tetrahydrobutylphtolid, siehe Sedanolid, riecht wie Sellerieöl (f).
Anethol, riecht anisartig (i).
Anisaldehyd (Aubépine), riecht nach blühendem Weißdorn (g).

d) Zitronengerüche.
Lynalylazetat, Träger des Bergamotgeruchs (e).
Zitral, Träger des Zitronengeruchs (g).

e) Amandelgerüche.
Benzaldehyd, Träger des Bittermandelölgeruchs (g).
Nitrobenzol, dem Amandelgeruch täuschend ähnlich (j).

3. Klasse. Balsamische Gerüche (odores fragrantes L.).

a) Blumengerüche.
Geraniol, riecht rosenartig (b).
Zitronellol, riecht rosenartig (b).
Nerol, riecht rosenartig (b).
Methylenphenylglykol und Homologe, riecht nach Jasmin (c).
Linalool, riecht maiblumenartig (b).
Dihydrocarveol, riecht nach Flieder (b).
Terpineol, hat angenehmen Fliedergeruch (b).
Anthranilsäuremethylester, riecht nach Orangenblüten (e).

b) Liliengerüche.
Zimtalkohol, siehe Styron, riecht nach Hyazinthen (b).
Piperonal, Heliotropin (g).
Ionon, Träger des Veilchenaromas (h).
Iron, Träger des Irisaromas (h).

c) Vanillegerüche.
Vanillin, Träger des Vanillegeruchs (g).
Cumarin, Waldmeister (f).
Metilotin, riecht cumarinähnlich (f).

4. Klasse. Ambermoschusgerüche (odores ambrosiaci L.).
Trinitrolbutyltoluol, Kunstmoschus (j).

5. Klasse. Allylkakodylgerüche.

a) Allylgerüche.
Azetylen.
Schwefelwasserstoff (m).
Merkaptan.
Alkylsulfide (m).
Allylsulfide (m).

b) Kakodylfischgerüche.
Arsenwasserstoff.
Phosphorwasserstoff.
Kakodyl.
Trimethylamin (k).

c) Bromgerüche.
Brom.

6. Klasse. Empyreumatische Gerüche (odoros empyreumatici Haller).
Benzol, Toluol, Xylol.
Phenol, Cressol (Creoline) (i).
Benzol, Naphthalin, Anthracen.

Naphthalin.
Acrolein.
Amylalkohol und Homologe (Handelsprodukte).
7. Klasse. Kaprylgerüche (odores hircini L.).
Kapronsäure und Homologe (l).
Pentamethylendiamin (k).
8. Klasse. Pyridin.
9. Klasse. Indol, Skatol (k).

Klassifikation der scharfen Riechstoffe.

Klasse 1. Äther, Formaldehyd.
„ 2. Kampfer, Eugenol.
„ 3. Ionon in größerer Konzentration.
„ 4.
„ 5. Merkaptan, Allylsulfid, Chlor, Jod.
„ 6. Ammoniak (Handelsprodukt).
„ 7. Ameisensäure, Essigsäure.
„ 8. Pyridin in mäßiger oder starker Konzentration.
„ 9. Skatol, konzentriert.

Klassifikation der schmeckenden Riechstoffe.

Klasse 1. Chloroform (süß), Äther (bitter), Formaldehyd (süß), Aldehyd (bitter), Essigsäureisobutyl (süßlich).
„ 2. Anethol (süß).
„ 3. Vanillin (süßlich), Cumarin (süßlich).
„ 4.
„ 5. Schwefelwasserstoff (süßlich).
„ 6.
„ 7. Fettsäuren (sauer).
„ 8.
„ 9. Skatol (nach einzelnen Beobachtern süßlich).

Lösungsmittel.

Da die Riechstoffe in den Versuchen selten rein, meistens in verdünntem Zustande Verwendung finden, bedürfen wir geeigneter flüssiger und fester Lösungsmittel. Diese Lösungsmittel sollen an und für sich vollkommen geruchlos sein und aus diesem Grunde ist ihre Zahl leider eine sehr beschränkte. Am besten bewährt haben sich Wasser, Glyzerin (spez. Gew. 1,26) und Paraffin (spez. Gew. 0,80). Die flüssige Form ist für die Versuchstechnik in weitaus den meisten Fällen die beste; vereinzelt kommen auch noch festes Paraffin oder feste Myristinsäure zur Verwendung.

Tabelle von in Wasser genügend löslichen Riechstoffen, welche bereits zu Riechversuchen verwendet worden sind.

I. Essigsaures Isoamyl, propionsaures Äthyl, essigsaures Isobutyl, Äthyläther, Chloroform, Formaldehyd, Paraldehyd, Azetat.
II. Camphora, Thymol, Benzaldehyd, Eugenol, Safrol, Eukalyptol, Carvon, Carvacrol.
III. Anthranilsäure-Methylester, Ionon, Iron, Cumarin.
IV. Trinitrobutyltoluol.
V. Schwefelwasserstoff, Allylsulfid, Trimethylamin, Brom, Schwefelkohlenstoff.
VI. Phenol, Anilin, Amylalkohol.
VII. Valeriansäure, Kapronsäure.
VIII. Pyridin.
IX. Skatol.

Viele wässerige Riechstofflösungen, bei starken Verdünnungen fast alle, leiden an dem Übelstande, daß sie nach einigen Tagen stark an Riechkraft abnehmen, ja sogar geruchlos werden. Schuld daran tragen offenbar die Umsetzungen, welche entweder unter dem Einfluß des Lichtes oder von Bakterien in verdünnten organischen Lösungen vielfach statthaben. Diesem Übelstande läßt sich einigermaßen vorbeugen, wenn man statt reinen Wassers eine wässerige $^1/_2$ %-ige Antifebrinlösung benutzt.[1]) Ich habe diesen Kunstgriff bei sehr verdünnten Iononlösungen mit Erfolg angewendet und dadurch wochenlange Haltbarkeit erzielt. Alle sauerstoffhaltigen Riechstoffe lösen sich ferner ausgezeichnet in einer konzentrierten 50 %-igen Lösung von Natrium salicylicum (Geraniol, Linalool, Zitronellol, Borneol, Menthol; Benzaldehyd, Salizylaldehyd, Anisaldehyd, Zimtaldehyd, Zitral, Zitronellal, Cuminaldehyd, Vanillin, Heliotropin; Carvon, Methylheptenon, Pulegon, Methylnonylketon, Menthon, Thujon, Kampfer; Eugenol, Thymol, Carvaerol; Cineol[2])). Für Terpineol scheint Natronbenzoat empfehlenswert.

Die Hinzufügung solcher Stoffe zu dem Lösungswasser ändert selbstverständlich einigermaßen die Verdampfungsgeschwindigkeit. A priori wäre dies keineswegs zu vernachlässigen. Findet man doch sogar im täglichen Leben Personen, die nach dem Geruch beurteilen können, ob der Tee gezuckert oder ihre Suppe gesalzen ist. So scharfen Beobachtern gegenüber hätte man sich nicht zu wundern, wenn auch die Versuchsergebnisse sich ein wenig ändern würden, sobald man zu einer 1 ‰ Iononlösung etwas Antifebrin hinzufügt. Für gewöhnlich kann man jedoch solch feine Unterschiede vernachlässigen, angesichts der übrigen, leider noch so zahlreichen und weit bedeutenderen Fehlerquellen.

Das Glyzerin hat sich für Vanillin und Caryophyllin als Lösungsmittel ausgezeichnet bewährt; das Paraffinum liquidum endlich ist für folgende Riechstoffe besonders geeignet.

I. Chloroform.
II. Borneol, Eukalyptol, Thymol, Eugenol, Anethol, Zitral, Nitrobenzol.
III. Cumarin, Heliotropin.
IV.
V. Äthylbisulfid, Allylsulfid.
VI. Guajakol.
VII. Kapronsäure.
VIII. Pyridin.
IX. Skatol.

Im allgemeinen riechen die Körper in wässeriger Lösung bedeutend stärker als in paraffinöser. So gibt z. B. 1 % Borneol in Natriumsalizylatlösung einen $7^1/_2$mal kräftigeren Geruch ab als in Paraffinum liquidum.

Lösungsmittel, die an sich nicht geruchlos sind, wird man vorläufig in der Physiologie prinzipiell vermeiden, in der Parfümerie hingegen werden derartige riechende Lösungsmittel vielfach benutzt. Hier verwendet man sie zur Herstellung von Mischungen, hauptsächlich auch zur Sicherung einer größeren Haltbarkeit des zusammengesetzten Riechstoffs. Sie werden im letzteren Fall als Fixants bezeichnet. Selten sind es reine Stoffe, meistens

1) Antifebrin (Azetanilid) ist im kalten Wasser 1 : 189 löslich.
2) Duyk, Bull. de l'Acad. roy. du méd. de Belgique 1899, S. 503.

Komplexe. Eine physikalische Erklärung der Wirkung solcher „Fixants“ ist bislang nicht gelungen. (Verdampfungskurve mit einem Minimumpunkte, für welchen die Verdampfung ohne Änderung der Zusammensetzung stattfindet (?)[1]).

II. Odorimetrie.

Jedem einzelnen chemisch reinen Riechstoffe kommt eine gewisse Riechkraft zu, deren Kenntnis für manche Zwecke wichtig ist. Sie wird gemessen durch die kleinste Menge Substanz, die, in einem Kubikzentimeter Luft verteilt, noch gerade ausreicht, um bei einer normalen Person eine minimale Geruchsempfindung hervorzurufen.

Die beste odorimetrische Methode ist die von J. Paßy, weil dabei die Fehlerquelle der summierten Adsorption der aufeinander folgenden Verdünnungen umgangen wird. Paßy träufelte den Riechstoff in verdünnter Lösung in einem Literkolben ab, ließ ihn dort bei normaler Temperatur oder unter leichter Erwärmung verdunsten und prüfte an dem bis dahin geschlossenen Kolben, ob seinem Luftinhalt ein Geruch zukam oder nicht.

Tabelle,
den Veröffentlichungen J. Paßys entnommen,
bezüglich der kleinstmöglichen riechbaren Menge Substanz pro Liter Luft.

Kampfer 5	10^{-6} g	Propylalkohol 10 à 5	10^{-6} g
Äther 1	„	Butylalkohol 1	„
Citral 0.5 à 1.0	„	Amylalkohol 1	„
Piperonal (Heliotropin) 0.1 à 0.05	„	Ameisensäure 25.	„
Cumarin 0,05 à 0,01	„	Essigsäure 5	„
Vanillin 0,005 à 0,0005 . . .	„	Propionsäure 0,05	„
Methylalkohol 1000.	„	Buttersäure 0,001	„
Äthylalkohol 250	„	Valeriansäure 0,01	„
Capronsäure 0,04	„	Laurinsäure 0,1	„
Önanthsäure 0,3.	„	Myristinsäure, geruchlos . . .	„
Caprylsäure 0,05	„	Chloroform	„
Nonylsäure 0,02	„	Bromoform.	„
Caprinsäure 0,05.	„	Jodoform	„

Der Methode Paßys nachgeahmt ist die weniger zeitraubende Odorimetrie in meinem sog. Riechkasten. (Fig. 1.) Mit diesem Namen bezeichne ich einen Glaskasten, dessen obere und seitliche Wände leicht abnehmbar sind, so daß sie durch Abwischen mit trocknem Tuche von dem adsorbierten Dufte rasch befreit werden können. Empfehlenswert ist es, das Tuch mit einer ganz geringen Menge pulverisierter Kreide zu bestreuen und damit das Glas abzureiben. Man kann sich dann oft begnügen, nur zwei der Wände fortzunehmen und die übrigen in situ abzuwischen. Die Luft innerhalb des Kastens ist während dieser Zeit erneuert und geruchlos geworden. In der Mitte der Vorderwand befindet sich eine Öffnung gerade groß genug, um die Nase durchzulassen. Die Öffnung bleibt bis zum Momente der Beobachtung durch ein vorgeschobenes Rezeptpapier verschlossen. In einem solchen vollständig geschlossenen und geruchlosen Raum[2]) läßt man eine

1) Über eine physiologische Erklärung siehe meine Physiologie des Geruchs, S. 282.
2) Arch. f. Physiologie 1902. Suppl., S. 421.

geringe Menge eines Riechstoffs sich verflüchtigen, indem man ihn rein oder in einem Tropfen Wasser gelöst in einem Uhrglas auf dem Glasboden des Kastens aufstellt. Die Abwägung der benutzten Menge geschieht auf einer analytischen Wage, wenn notwendig auf der Nernstschen Mikrowage.

Die odorimetrischen Schwellenbestimmungen geschehen unter Benutzung des Riechkastens in folgender Weise:

Man überzeuge sich zuerst, daß die Luft in dem allseitig verschlossenen Kasten wirklich geruchlos ist. Ist dies nicht der Fall, so werden die numerierten Seitenwände abgenommen und die vier übrigen Wände mit einem bekreideten Handtuche abgewischt und der Luftraum selbst ausgefächelt.

Hierauf wird das Uhrglas mitten auf die gläserne Bodenfläche gesetzt, nachdem man unmittelbar vorher einen Tropfen der beliebig verdünnten Riechstofflösung darauf so gut als möglich ausgebreitet hat. Im gleichen Augenblick setzt man einen Chrono-

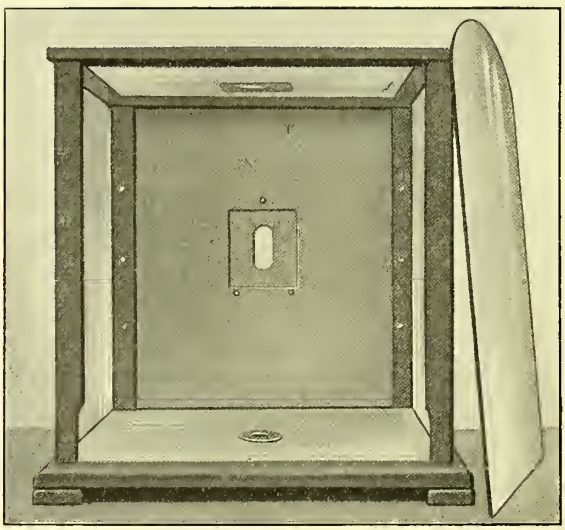


Fig. 1. Riechkasten.
Länge, Breite, Tiefe = 40 cm.
Die eine Öffnung zum Riechen enthaltende Vorderwand ist aus Aluminium, alle übrigen aus Glas gemacht.

meter in Gang und bestimmt die zur vollständigen Verdunstung des Tropfens erforderliche Zeit. Nötigenfalls kann man die Verdampfung durch vorsichtige Erwärmung des Kastenbodens beschleunigen. Nach Beendigung der Verdampfung wartet man noch weitere 5 Minuten.

Nach Ablauf derselben nimmt man das Rezeptpapier von der Kastenöffnung weg, aspiriert durch dieselbe und stellt so fest, ob man keinen, schwachen oder deutlichen Geruch wahrnimmt. Bei negativem Ausfall wiederholt man die Aspiration alle 5 Sekunden. Je nach dem Resultat dieser vorläufigen Bestimmung benutzt man zu einem zweiten Versuch eine verdünntere oder eine mehr konzentrierte Riechstofflösung.

Die von uns modifizierte Methode Paßys, die im Grunde auch bereits Fischer und Penzoldt vorher in Anwendung gebracht hatten[1]), ist ganz

1) Biol. Zentralbl. Bd. VI, S. 61, 1886. Sie fanden pro Liter Luft $^1/_{23000000}$ mgr Merkaptan noch riechbar. Die Riechkraft des Chlorphenols zeigte sich noch 100 mal größer.

allgemein anwendbar. Sie ist für jeden beliebigen Riechstoff geeignet. Nur müssen diejenigen, die bereits in äußerst großer Verdünnung riechbar sind, in wässeriger Lösung in Anwendung gebracht werden. Andere Lösungsmittel sind unbrauchbar, weil sie entweder selbst riechen [1]) oder unvollkommen verdunsten.

Ich habe oben die Riechkraft eines Riechstoffs definiert als eine Größe, die gemessen wird durch den reziproken Wert der kleinsten Menge Substanz, die in 1 ccm Luft verteilt noch gerade eine Geruchsempfindung hervorruft. Die bis jetzt angestellten Versuche haben uns die in der folgenden Tabelle zusammengestellten Werte ergeben:

Tabelle.

	Menge im Riechkasten verflüchtigt	pro Kubikzentimeter Luft
I. Azetaldehyd	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$ g	$0{,}7 \cdot 10^{-9}$ g
Azeton	$2{,}7 \cdot 10^{-4}$ „	$0{,}4 \cdot 10^{-8}$ „
Methylazetat	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$ „	$0{,}2 \cdot 10^{-8}$ „
Isoamylazetat	$6{,}7 \cdot 10^{-3}$ „	$9 \cdot 10^{-8}$ „
II. Kampfer	$1 \cdot 10^{-6}$ „	$1{,}6 \cdot 10^{-11}$ „
Nitrobenzol	$2{,}6 \cdot 10^{-3}$ „	$4{,}1 \cdot 10^{-8}$ „
III. Anthranylsaurer Methylester	$4 \cdot 10^{-9}$ „	$6 \cdot 10^{-12}$ „
α-Jonon	$6 \cdot 10^{-9}$ „	$1 \cdot 10^{-13}$ „
Terpineol	$1{,}1 \cdot 10^{-1}$ „	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$ „
IV. Trinitrobutyltoluol	$6 \cdot 10^{-8}$ „	$1 \cdot 10^{-12}$ „
V. Äthylbisulfid	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$ „	$3 \cdot 10^{-10}$ „
VI. Methylalkohol	$4 \cdot 10^{-2}$ „	$6 \cdot 10^{-7}$ „
Isobutylalkohol	$3{,}3 \cdot 10^{-2}$ „	$5 \cdot 10^{-7}$ „
Phenol	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$ „	$4 \cdot 10^{-9}$ „
Guajakol	$2{,}4 \cdot 10^{-4}$ „	$3{,}7 \cdot 10^{-9}$ „
VII. Ameisensäure	$4 \cdot 10^{-2}$ „	$6{,}4 \cdot 10^{-7}$ „
Valeriansäure	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$ „	$2{,}1 \cdot 10^{-9}$ „
VIII. Pyridin	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$ „	$4 \cdot 10^{-11}$ „ [2])
IX. Skatol	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$ „	$4 \cdot 10^{-13}$ „

In obenstehender Tabelle sind die Quantitäten in Milligramm angegeben. Man könnte vielleicht geneigt sein, sie lieber in Grammmolekülen auszudrücken. Für Riechstoffe, welche sich in gasförmigem Zustande nicht polymerisieren, hat dies gewiß seine Berechtigung; es sind jedoch bereits Beispiele der Zusammenlagerung von Molekülen [3]) bekannt geworden und auch Dissoziationen sind nicht ausgeschlossen. Vorerst wird man daher derartige Umrechnungen im

1) Paßy benutzte gelegentlich Methylalkohol (Äthylalkohol als Lösungsmittel wird auch von ihm abgeraten).

2) J. Hermanides fand $1{,}6 \cdot 10^{-10}$ g pro Kubikzentimeter Luft.

3) Gilt z. B. für Essigsäure und manche andere Körper (siehe E. Beckmann, Ztschr. f. physik. Chemie Bd. VI, S. 442). Über die große Verbreitung sogenannter anomaler Substanzen, d. h. Körper, die Unterschiede in der Molekulargröße zwischen dem gasförmigen und dem flüssigen Zustande aufweisen, siehe Bakhuis-Roozeboom, Heterogene Gleichgewichte 2. Heft, S. 1.

allgemeinen zu vermeiden haben. In manchen Fällen und zu manchen Zwecken aber wird kein Bedenken dagegen zu erheben sein. Man hat dann den Vorteil, eine Zahl zu bekommen, deren reziproken Wert man ohne weiteres die spezifische Riechkraft des betreffenden Riechstoffs nennen könnte. Ich lasse hier einige solcher Zahlen folgen.

Spezifische Riechkraft einzelner Körper.

Riechstoff	Molekulargewicht	Reizschwelle in Milligramm pro Kubikzentimeter Luft	Reizschwelle in Gramm-Molek. pro Kubikzentimeter Luft	Spez. Riechkraft
Chloroform (nach Paßy) . .	118	0,030	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{6}$
Bromoform (nach Paßy) . .	253	0,002	$7{,}9 \cdot 10^{-9}$	$1{,}3 \cdot 10^{8}$
Jodoform (nach Paßy) . .	394	0,00006	$1{,}5 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{9}$
Methylalkohol	32	0,0003	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{8}$
Ameisensäure	46	0,0006	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$	$7{,}7 \cdot 10^{7}$
Azeton.	58	0,00004	$7 \cdot 10^{-10}$	$1{,}4 \cdot 10^{9}$
Kampfer	152	0,000000048	$3 \cdot 10^{-13}$	$3{,}3 \cdot 10^{12}$
Ionon	192	0,000000000095	$5 \cdot 10^{-16}$	$2 \cdot 10^{18}$

III. Das Riechen im Experiment.

Bei gehaltener Atmung findet für gewöhnlich kein Riechen statt, denn im allgemeinen ist das Riechen an die Atmung gebunden und zwar erfolgt es, wenn die Riechquelle sich außerhalb des Körpers befindet, vorwiegend inspiratorisch, dagegen exspiratorisch, wenn die Riechquelle sich im Munde oder im Pharynx befindet.

a) Das Riechen während des ruhigen Atmens.

Nur in seltenen Fällen wurde dies experimentell verwertet, in der letzten Zeit hauptsächlich von Féré[1]) bei Ergographversuchen am Menschen, und von H. Bayer[2]) zum Studium der Atemreflexe am Kaninchen. Nur letzterer verwendete reine Riechstoffe.

b) Schnüffelndes Riechen.

Diese Art des Riechens findet fast in allen physiologischen Versuchen Anwendung, entweder in der Weise, daß wirklich kräftig inspiriert wird, während die Nasenflügel gehoben und die Nasenlöcher beiderseits weit geöffnet sind (was der Laie als schnüffeln zu bezeichnen pflegt) oder in der Weise, daß mehr langsame, ganz vorsichtige Inspirationen stattfinden, womit man die für das Riechen günstigsten Atembedingungen herzustellen versucht. Die Luftmenge, die durch eine kurze plötzliche Schnüffelinspiration eingezogen wird, beträgt nach Valentin ungefähr 50 ccm. Ich glaube, daß dies im allgemeinen zutrifft, sowohl für das freie Riechen als auch für das

1) l'Année physiologique Bd. 7, S. 69 u. 82.
2) Arch. f. Physiologie 1901, Bd. 261.

Riechen am Apparat. Übrigens mögen um diesen Mittelwert herum die Werte ziemlich erheblich schwanken. Zur Bestimmung dient Gads Atemvolumschreiber. Folgende drei Erscheinungen werden beobachtet:

1. Mittelkräftige Gerüche werden nur wahrgenommen, wenn sie durch die vordere Hälfte des Nasenlochs eintreten (Ficks Phänomen). Am bequemsten überzeugt man sich hiervon auf folgende Weise: Wenn man ein Glasrohr von ungefähr 10 cm Länge und $^1/_2$ cm Innenweite innerlich teilweise mit etwas Filtrierpapier auskleidet, letzteres mit irgendeiner nicht scharf reizenden Riechstofflösung, z. B. Kampferwasser (1 : 1000[1])) tränkt und das Rohr beim Schnüffeln in die hintere Hälfte des Nasenlochs hineinschiebt, bemerkt man nichts von Kampfergeruch; der Geruch wird aber sofort deutlich, wenn man das Rohr in die vordere Hälfte bringt.

2. Die Empfindung von mittelstarken Gerüchen schneidet am Ende der Inspiration scharf ab (v. Vintschgaus Phänomen). Auch dies läßt sich mit den oben angegebenen Kampferröhrchen sehr schön dartun.

3. Wenn ein Riechreiz durch aufeinander folgende Schnüffelbewegungen intermittierend wird, entsprechen den gesonderten Impulsen auch gesonderte Empfindungen, während umgekehrt, wenn die Unterbrechungen außerhalb des Körpers erfolgen, die Empfindung eine kontinuierliche ist. Die erstere Hälfte dieses Satzes läßt sich nur mit Hilfe eines Olfaktometers nachweisen (siehe unten S. 63), der die Anwendung genau graduierter Reize gestattet, weil bei dem Versuche zu starke Riechreize vermieden werden müssen. Die zweite Hälfte läßt sich mit jeder größeren Mareyschen Kapsel dartun, man braucht sie nur von einer an sie anstoßenden langsam schwingenden Stimmgabel in Bewegung setzen zu lassen und das mit der Kapsel in gewöhnlicher Weise verbundene Kautschukrohr mittels eines gläsernen Verbindungsstücks in die Nase zu leiten.

Die drei genannten Erscheinungen sind offenbar begründet in der eigentümlichen Richtung, welche der zum Riechen dienende Luftstrom in der Nase nimmt. Die eingezogene Luft beschreibt eine bogenförmige Bahn, die ungefähr am Unterrand der mittleren Muschel vorbeistreicht[2]). Nur aus der vorderen, oberen Schicht dieses Luftstroms können innerhalb der kurzen Zeit einer Inspiration Riechteilchen in die Riechspalte hineindiffundieren (daher das Ficksche Phänomen). Bei Beendigung der Inspiration, im Moment, wo die Stromrichtung wechselt, ergeben sich in den hinteren Teilen der Nasenhöhle Luftwirbel, welche die in der Riechbahn strömende Luft zerstreuen. Die riechenden Teilchen verteilen sich infolgedessen rasch in die geräumigen Nasengänge und den Pharynx; ihre Dichte sinkt unter die Schwelle. Daher bei schwachen und mittelstarken Gerüchen das plötzliche Abschneiden der Empfindung, d. h. das Vintschgausche Phänomen. Die Strombahn der inspirierten Luft geht, wie gesagt, an dem unteren Rande der mittleren Muschel vorüber, reicht also nicht bis zur Regio olfactoria hinauf. Zwischen dem äußeren Reiz und dem Empfangsort der Reizung liegt eine gewisse Luftstrecke eingeschoben, welche die riechenden Teilchen durch Diffusion zurücklegen müssen. Die Luft am Eingang der Riechspalte bildet ein eingeschobenes Zwischenglied, welches verhindert, daß weder getrennte Riechreize zum Zusammenfließen, noch continuierliche zum Intermittieren gebracht werden können.

---

1) In diesem Falle gibt man der Auskleidung eine Länge von 1 cm.

2) Paulsen, Franke, Kayser, in neuer Zeit Danziger, Monatsschr. f. Ohrenheilk. 1896, S. 331 u. Rethi, Sitzber. d. Wien. Akad. Bd. 109, Febr. 1900. Schieffer-decker, Niederrhein. Ges. f. Natur- u. Heilk. zu Bonn, 1903.

c) Gustatorisches Riechen.

Beim Menschen steht gegenüber der ästhetischen und akzidentellen Verwendung des Geruchsorgans die gustatorische sehr stark im Vordergrund. Während ein Bissen in der Mundhöhle verweilt, dringt der Geruch des Nahrungsmittels in den Pharynx. Die Ausatmung nimmt die Riechteilchen mit und in diesem Augenblicke spürt man deutlich das Aroma der Speise. Beim Trinken vollzieht sich ein ähnlicher Vorgang. Während des Schluckens ist das Cavum pharyngo-nasale abgeschlossen, daher ist es in diesem Augenblicke unmöglich das Getränk zu riechen, unmittelbar nachher jedoch bildet die ganze Pharynxschleimhaut eine breite Verdampfungsfläche und die Düfte des Getränks werden im selben Augenblick von der schwachen Ausatmung des Schluckatmens[1]) eben noch mitgenommen und in die Nase geführt. Versuche über das gustatorische Riechen lassen sich am besten anstellen, wenn man die Versuchsperson veranlaßt, sich bei geöffnetem Munde mit einem Türkschen Zungenhalter die Zunge herabzudrücken. Hat man vorher auf der breiten oberen Fläche dieses Zungenhalters ein 15 cm weites Glasrohr befestigt, so kann dieses bequem mit irgendeiner Riechquelle ohne Einschaltung von Kautschukröhren verbunden werden. Mittels einer kleinen an die Wasserleitung angeschlossenen Druckpumpe treibe man dann die Luft, über die Riechquelle, durch das Röhrchen in den Pharynx hinein.

d) Insufflation in die Nase.

Vereinzelt hat man zu Versuchen Insufflationen von mit Riechstoff beladener Luft in die Nase benutzt. Solche Einblasungen können kontinuierlich geschehen oder ruckweise. Nur die letztere Art hat sich bewährt. Die Richtung, welche man dabei dem Luftstrom gegeben hat, ahmt gewöhnlich den natürlichen nach, unterscheidet sich davon jedoch durch die größere Kraft, mit welcher die Luft emporsteigt. Gleichviel in welcher Form man übrigens solche Einblasungen von Luft behufs der Erweckung von Geruchsempfindungen vornimmt, stets darf kein einziger Teil der Strombahn aus Kautschuk hergestellt sein, weil dieser Stoff einerseits selbst Geruch abgibt, andererseits manche Gerüche ungemein fest adsorbiert. Die vor dem Anschluß an die Nase liegende Strombahn muß also gänzlich aus Glas und Metall gebaut sein. Als Insufflator dient entweder eine Wasserdruckpumpe, deren Hahn man öffnet und schließt, oder ein lederner Blasebalg, von dessen Geruchlosigkeit man sich natürlich vorher überzeugt haben muß. Die Bläsebälge für künstliche Respiration sind zu diesem Zweck sehr geeignet. Bei messenden Versuchen ist es erwünscht, die Kraft der Luftstöße, bzw. die transportierte Luftmenge beurteilen zu können. Ein geeigneter Meßapparat ist dann das Aerodromometer, ein in einem vertikalen Glasrohr zwischen zwei leichten Metallfedern aufgehängtes Aluminiumscheibchen, ein Instrument, dessen Beschreibung bei der Olfaktometrie folgt.

Gelegentlich wird man sich auch eines Luftstroms bedienen können, der durch das eine Nasenloch ein-, durch das andere austritt. Zu diesem Zweck ist eine Wasseraspirationspumpe als Triebkraft zu empfehlen. Wenn man einen solchen, durch die beiden Nasenlöcher herumgeführten Luftstrom

1) Die Schluckatembewegung des Menschen. Arch. f. Physiologie 1904, S. 57.

mit einem Riechgas beschwängert, so wird das im allgemeinen nicht genügen, einen Geruchseindruck hervorzubringen, wenigstens solange man die Atmung sistiert. Nur falls man besonders rasch diffundierende Riechstoffe, z. B. essigsaures Isobutyl, benutzt, wird man einen Geruchseindruck wahrnehmen können.

c) Die Anfüllung der Nasenhöhle mit duftender Flüssigkeit.

Die erste Anforderung, der eine zur Anfüllung der Nasenhöhle bestimmte Flüssigkeit zu entsprechen hat, ist die, daß sie für Schleimhaut und Geruchsorgan unschädlich sei. Aus diesem Grunde wird man mit Vorliebe wässerige, isotonisch und etwas erwärmte Lösungen nehmen. Bisher ist die Isotonie meist durch Hinzufügung von Chlornatrium hergestellt und sind die duftenden Substanzen immer nur in sehr geringer Konzentration beigemengt worden.

Wenn man eine solche duftende Flüssigkeit nach Art einer Weberschen Nasendouche anwendet, kommt die Geruchsempfindung offenbar zustande, indem der Riechstoff verdampft und in die oberen luftgefüllten Partien der Nasenhöhle hinein diffundiert. Anders jedoch, wenn man, wie Aronsohn [1]) vorschreibt, eine so besondere Stellung einnimmt, daß sich das Dach der Nasenhöhle am tiefsten befindet. Abgesehen davon, daß eine solche sonderbare Lage kaum auch nur einige Zeit innegehalten werden kann, bleibt in diesen Fällen doch gewöhnlich noch eine Luftblase zurück, so daß der Riechstoff in gasförmigem Zustande auf das Sinnesorgan einwirken kann. Nur bei ganz besonderen Vorsichtsmaßregeln wird, wie E. Veress [2]) ausführlich beschreibt, wirklich Flüssigkeit in die Riechspalte hineindringen können. Hier wird sie dann als heterologer Reiz einwirken. Für die eigentliche Olfaktologie hat also die Methode keine Bedeutung.

Gaule [3]) hat in seiner Bearbeitung der Physiologie des Geruchs in Heymanns Handbuch der Laryngologie wahrscheinlich zu machen versucht, daß Riechstoffe nicht nur als Gase, sondern auch noch in der Form feinster Tröpfchen zu dem Geruchsorgan gelangen können. Schließt man sich dieser Meinung an, so wäre der Spray ein empfehlenswerter Apparat zur Beibringung von Riechreizen. Die Riechstoffe könnten dann in wässeriger und in paraffinöser Lösung (letztere in einem weitmündigen amerikanischen Spray) zur Verwendung kommen. Ganz ungefährlich für die Integrität des Sinnesorgans sind solche Prozeduren nach rhinologischer Erfahrung jedoch nicht.[4])

IV. Olfaktometrie.

Die Olfaktometrie bezweckt, die Geruchsschärfe eines normalen oder pathologischen Geruchsorgans für einen bestimmten Riechstoff unter genau gegebenen Bedingungen festzustellen. In der Physiologie wird man wohl

1) E. Aronsohn, Experimentelle Untersuchungen zur Physiologie des Geruchs. Inauguraldiss. Berlin, 3. Mai 1886.

2) E. Veress, Pflügers Archiv, Bd. 95, S. 368, 1903.

3) Gaule in Heymanns Handb. d. Laryngol. und Rhinol., Bd. III. S. 152.

4) Vergl. C. Zarniko, Die Krankheiten der Nase und des Nasenrachens, 2. Aufl., S. 570.

nur mit normalen Geruchsorganen zu schaffen haben, aber auch bei diesen hat man, bevor man zu den eigentlichen Prüfungen schreitet, sich zu überzeugen, daß die Nasenhöhle sich in für Luft völlig durchgängigem Zustande befindet. Leichte Kongestionen und Schwellungen der Nasenschleimhaut sind bei übrigens gesunden Personen so überaus häufig, daß der experimentierende Physiolog damit unbewußt selbst behaftet sein kann. Man überzeuge sich deshalb grundsätzlich am Tage des Versuchs selbst mittels der Methode der Atemfleeke (Fig. 2) vom Freisein der Nasenhöhle. Hierzu hält man einen Metallspiegel oder irgendeine polierte Metallfläche etwas über die Oberlippe horizontal unter die Nase. Beim Ausatmen (nicht blasen!) durch die Nase entstehen dann normaliter auf der spiegelnden Fläche durch Atembeschlag symmetrische Flecken, an welchen man zu jeder Seite beim langsamen Verschwinden der Dampffigur eine Spaltung je in eine anterolaterale und eine postero-mediale Hälfte unterscheiden kann. Ist eine der Nasenhälften verengt, so ist der betreffende Flecken deutlich kleiner und verschwindet früher als der andere, der nicht verengten Nasenhälfte entsprechende. Ist außer Verengung auch noch Unregelmäßigkeit der unteren Nasenmuschel vorhanden, so kann die Spaltung eines oder beider Atemflecken ausbleiben.

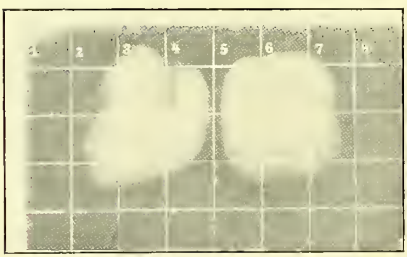


Fig. 2.
Atemflecken (Momentphotographie).
Der Atembeschlag auf einer polierten Metallplatte bildet normaliter einen symmetrischen Doppelflecken. Der rechte sowie der linke Fleck zeigt die Spaltung in einen anterolateralen und einen posteromedialen Teil.

Eine zweite Vorbedingung zur richtigen Olfaktometrie ist die, daß man in einer geruchlosen Umgebung arbeitet. Das Laboratorium einer Parfümeriefabrik ist hierzu ungeeignet und auch ein Studierzimmer, wo fortwährend geraucht wird, soll vermieden werden.

Die soeben angegebenen Einschränkungen gelten für alle Methoden der Olfaktometrie. Die jetzt folgenden speziellen Angaben beziehen sich auf Riechmessungen, die nach dem Prinzip der übereinander geschobenen Zylinder angestellt werden. Dieses Prinzip spielt bei den Riechversuchen die gleiche Rolle wie das der wechselnden Spaltenweite in der Optik. Es erlaubt, in kurzer Zeit, mit schwachen Reizen anfangend, die Reize plötzlich oder allmählich in jeder beliebigen Weise abzustufen. In der technischen Ausführung wird man sich in der Regel auf eine verschiebbare Breite von 10 cm beschränken. Der äußere Zylinder, den wir „olfaktometrischen Zylinder“ nennen wollen, hat dabei als Riechquelle zu fungieren. Der innere Zylinder, den wir „Riechrohr“ nennen, deckt eingeschoben die Riechquelle vollständig, während er ausgeschoben eine riechende Fläche von höchstens 10 cm Länge freigibt.

Wenn man die Luft vor dem Einatmen durch ein derartiges System von Röhren ziehen läßt, nimmt man keinen Geruch wahr, solange die Zylinder ineinander geschoben sind. Sobald der Außenzylinder jedoch vorgeschoben ist, spürt man einen mehr oder weniger deutlichen Geruch. Er

wird sich schwächer oder stärker kundgeben, je nach der Art des angewendeten Stoffes und je nach der Länge, über welche die riechende Fläche freigegeben ist. Ein Satz solcher Röhren wird zum Riechmesser in seiner einfachsten Gestalt, wenn man das Innenrohr etwas länger nimmt als das mit der Riechquelle beschickte Außenrohr. Man ist dann imstande, dieses herausragende, ungefähr 5 cm lange Stück des Innenrohrs nach oben umzubiegen und in die vordere Hälfte der Nasenöffnung einzuführen. Um das zweite Nasenloch vor dem Riechgase zu schützen, läßt man das Riechrohr durch einen durchbohrten Schirm gehen. Diese Form besaß mein Olfaktometer von 1888, für welchen als Außenzylinder meist ein fester Riechstoffzylinder von 8 mm im Lichten gewählt wurde. Das Innenrohr hatte 5 mm im Lichten und paßte bei einer Wanddicke von $1^1/_2$ mm ganz genau in das Außenrohr hinein (Fig. 3).

Obgleich dieser einfache Riechmesser für manche Zwecke noch recht brauchbar ist, so wird man bei fortgesetzten und nach verschiedenen Richtungen sich erstreckenden Untersuchungen eine vervollkommenere Gestalt bevorzugen, welche die Anwendung von Riechstofflösungen gestattet und eine größere Stabilität besitzt. Am besten wird ein solcher Apparat der Raumersparnis wegen und auch noch aus anderen Gründen in Doppelform gebaut.

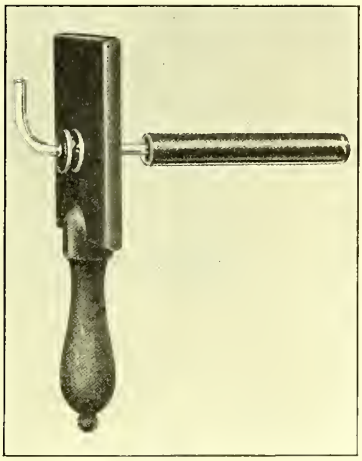


Fig. 3.
Einfacher Riechmesser (1888).
Der verschiebbare Zylinder enthält einen festen Riechstoff; das durch das Schirmchen hindurchgehende Riechrohr wird, während man aspiriert, in die vordere Hälfte des Nasenlochs gebracht.

Auf einem mit 3 Stellschrauben versehenen, nicht zu leichten Stativ ist ein horizontales Doppelgeleise angebracht. Die beiden Geleise sind durch einen Metallschirm voneinander getrennt (siehe weiter unten Fig. 6 und 7). An der vorderen, dem Beobachter zugewandten Seite befindet sich ebenfalls ein Metallschirm, ungefähr 25 cm breit und 20 cm hoch, der, quer auf die Geleise gestellt, mit seinem Oberrand ungefähr 15 cm über deren Niveau hervorragt. Der letztere größere Schirm ist an zwei symmetrischen, über den Geleisen gelegenen Stellen von zwei vollkommen gleichen Glasröhren durchbohrt, die als Riechröhren zu dienen haben und deshalb in geeigneter Weise gekrümmt sind. Auf den Geleisen gleiten die als Riechquellen fungierenden, 10 cm langen Außenzylinder leicht hin und her. Die Geleise müssen daher eine Länge von etwas mehr als 20 cm, in der Regel $27^1/_2$ cm besitzen. Ein Maßstab, der dem Geleise entlang angebracht ist, gestattet in jedem Augenblick den Stand des Außenzylinders abzulesen (siehe weiter unten Fig. 7).

Die olfaktometrischen Zylinder sind in besonderer Weise konstruiert (Fig. 4). Das Riechrohr umschließt eine aus irgendeiner porösen Substanz angefertigte Röhre von $\pm 2^1/_2$ mm Wanddicke. Diese letztere muß fortwährend und in vollkommen gleichmäßiger Weise mit der zu benutzenden Riechstofflösung imbibiert gehalten werden. Zu diesem Zweck ist sie in

kurzer Entfernung von einem dickwandigen Glasrohr umgeben, so daß ein Zwischenraum von ca. 50 ccm frei bleibt. Dieser Zwischenraum wird an der vorderen und hinteren Seite hermetisch abgeschlossen durch ein Paar schwere, mit Kork bekleidete Metallplatten, die mittels dreier Leitstangen fest gegen die poröse Röhre und die gleich lange dickwandige gläserne Außenwand angeschraubt werden können. Eine kleine Eingußöffnung in der vorderen oder hinteren Metallplatte gestattet die Anfüllung des Zwischenraums mit der Riechstofflösung, mit welcher nach und nach auch die poröse Substanz des eigentlichen Riechzylinders sich imbibiert und so eine unerschöpfliche, immer vorhandene Riechquelle herstellt.

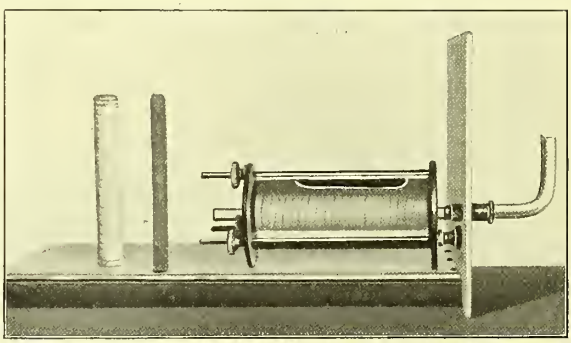


Fig. 4. Schema eines Riechmessers mit Magazinzylinder. Der Magazinzylinder enthält einen in Wasser, Glyzerin oder flüssigen Paraffin gelösten Riechstoff, der das poröse Innenrohr imbibiert, aber nicht heraussickert, weil das zwischen dieses und den Glasmantel gefaßte Magazin hermetisch verschlossen ist. Das Ganze kann vor- und rückwärts geschoben werden über ein gläsernes Riechrohr, das durch den Metallschirm hindurchgeht und während des Versuchs in die vordere Hälfte des Nasenlochs hineingebracht wird.

Als Material dient entweder Filtrierpapier oder poröses Porzellan.

Herstellung eines porösen Zylinders aus Papier.

Es wird ein kleines Zylinderchen aus Nickelgaze von genau 10 cm Länge und 0,8 cm Weite angefertigt; die Gaze selbst hat eine Dicke von 0,5 mm. Die Gesamtoberfläche der Maschenzwischenräume ist dann gleich derjenigen der Gesamtgitterbreite. Um dieses Zylinderchen wird auf der Drehbank gewöhnliches Filtrierpapier gewickelt. Der Arbeiter soll für saubere Hände und überdies dafür Sorge tragen, daß er das Papier nicht berührt, sondern nur mittels eines anderen reinen Papiers festhält. Man wickelt so lange immer neue Schichten, bis man ein massives Papierzylinderchen von $2^1/_2$ mm Wanddicke erhalten hat.

Herstellung eines porösen Zylinders aus Porzellan.

Die porösen olfaktometrischen Zylinder werden von der Firma t'Hooft & Labouchère in Delft aus verschiedenen Arten Töpferwerk verfertigt. Wir wählten ein Gemenge von drei Gattungen Ton, nämlich einer fetten

und einer mageren und einer an Kieselsäure reichen Tonerde. Diese drei Bestandteile werden in einem Schmelztiegel gemischt. Die Porosität dieser Röhren wird je nach der Temperatur des Ofens etwas verschieden ausfallen. Der Tongeruch ist minimal. Die Lichtweite des Zylinders soll genau 8 mm messen; der Umkreis beträgt dann 25 mm, eine Zahl, welche die Berechnung der riechenden Oberfläche aus der vorgeschobenen Zylinderlänge erleichtert. Es gelingt jedoch beim Brennen der Zylinder nicht immer, die gewünschte Weite zu erzielen, denn der Ton schrumpft beträchtlich mehr oder weniger, je nach der jeweiligen Temperatur des Ofens und der Zusammensetzung der Tonmasse, zusammen. Dem Fabrikanten wird es nur dann allmählich gelingen, die richtigen Mischungsverhältnisse zu treffen, wenn er wiederholt nacheinander Zylinder aus demselben Gemenge an verschiedenen Stellen des Ofens brennt. Zu weite Zylinder sind voll-

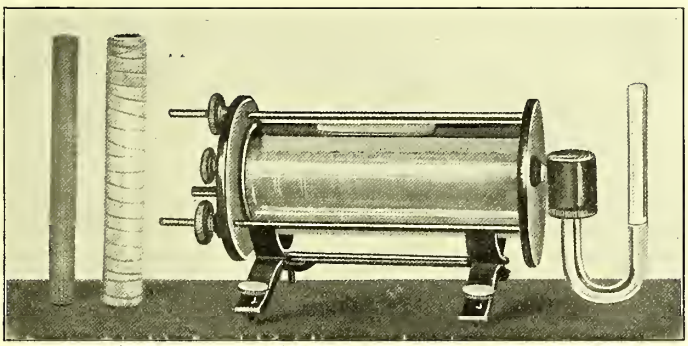


Fig. 5. Reserve-Magazinzylinder.
a. Gazestütze, b. poröser Papierzylinder, c. mit Manometer montierter und gefüllter Magazinzylinder.

kommen unbrauchbar, zu enge könnten nötigenfalls mit einem Glasstäbchen ausgefeilt werden.

Im trocknen Zustande sind diese Zylinder völlig geruchlos, sobald man sie jedoch mit Wasser in Berührung bringt, bekommen sie einen eigentümlichen Steingeruch, von dem sie erst dadurch befreit werden, daß man sie einige Stunden in strömendem Wasser liegen läßt und vollkommen durchnäßt benutzt. Man kann diese umständliche Prozedur jedoch umgehen und, ebenso wie im trocknen Zustande, den Steingeruch ausschalten, wenn man sie ausschließlich mit paraffinösen Riechstofflösungen tränkt. Ich habe daher in den letzten Jahren bei der Benutzung solcher porösen Porzellanröhren nur geruchloses Paraffinum liquidum als Lösungsmittel der zu verwendenden Riechstoffe verwendet.

Zusammenstellung des Magazinzylinders.

Die Zusammenstellung des Magazinzylinders ist dieselbe bei Benutzung eines Papierzylinderchens wie bei jener der gebrannten Delftschen Kaolinmasse. Wir werden sie für den Fall, daß ein Papierzylinderchen gewählt wird, beschreiben.

In Figur 5 sind die drei Stadien noch einmal nebeneinander gestellt. Bei a das Zylinderchen aus Metallgaze, bei b der Papierzylinder und bei c der vollständige Magazinzylinder. Letzterer bleibe immer genau horizontal aufgestellt. Gerade zu diesem Zwecke ist der Fuß des Laboratoriumriechmessers mit Stellschrauben versehen. Wird der Zylinder nicht benutzt, so kann er abgenommen und auf einen kleinen, ebenfalls mit Stellschrauben versehenen Untersatz beiseite gestellt werden. Die immer zurückbleibende Luftblase dient als Libelle. In der Figur ist noch ein kleines kommunizierendes Rohr dargestellt, das, gewöhnlich fortgenommen, dem Leser hier zeigt, wie gering der Filtrationsdruck ist, dem die ganz allmählich durchsickernde Flüssigkeit ausgesetzt ist. Derselbe ist nahezu Null. Das Niveau im äußeren kommunizierenden Rohr ist jenem des unteren Lumenrandes gleich. In den im Flüssigkeitsmantel sich bildenden Luftblasen muß also ein geringerer Druck herrschen als eine Atmosphäre. Die negative Differenz ist gleich der der Höhe zwischen unterem Lumenrand und Luftblase befindlichen Flüssigkeitssäule, d. h. ein paar Zentimeter.

Um einen solchen Magazinzylinder mit riechender Flüssigkeit zu füllen, wird er vertikal gestellt und die Schraube der oberen Eingußöffnung fortgenommen; dann gießt man die Flüssigkeit aus einer Pipette schnell hinein. Während man damit beschäftigt ist, filtriert die Flüssigkeit reichlich ab. Sobald aber die Eingußöffnung verschlossen wird, beschränkt sich der weitere Verlust auf ein ganz unbedeutendes Quantum, das gerade hinreicht, um die Maschenräume der Gazestütze und die Außenwand des hineingesteckten Innenröhrchens zu befeuchten. Offenbar filtriert die Flüssigkeit nur so lange ab, bis die über die Flüssigkeit zurückgebliebene Luft den soeben genannten Druckwert angenommen hat. Es ist also vorteilhaft, den Mantel nahezu vollständig zu füllen, denn dann stellt das Gleichgewicht zwischen dem atmosphärischen Druck außen und dem hydrostatischen Druck innen sich rasch her. Eine größere Luftblase läßt weit mehr Flüssigkeit abfließen, bis sie sich so weit vergrößert hat, daß die erforderliche Druckerniedrigung erreicht ist.

Auf die Dauer wird sich etwas mehr Luft ansammeln und zwar infolge eines sehr geringen Flüssigkeitverlustes, der in folgender Weise zustande kommt. Die Figur gibt den Manometerstand bei vollständig vorgeschobenem Zylinder an. Schiebt man den Zylinder jedoch so weit zurück, daß zwischen Nickelgaze und Innenröhrchen sich eine kapillare Flüssigkeitsschicht bilden kann, so unterhält die kapillare Wirkung eine Saugung von ungefähr 1 cm, und tritt dadurch ein klein wenig Flüssigkeit, die beim späteren Vorschieben des Zylinders teilweise der Verdampfung anheimfällt, aus.

In den ersten Augenblicken der Füllung kommt es vor, wenigstens bei einzelnen Riechmessern, daß das Papierzylinderchen und seine Gazestütze innerlich zwar feucht, aber nicht riechend sind.[1]) Wenn man aber einige Stunden wartet, bis die vollständige Imbibierung erfolgt ist, erscheint der Duft in voller und später auch nicht mehr zunehmender Intensität. Dies entspricht der alltäglichen Erfahrung der Chemiker, daß die meisten der hier in Betracht kommenden Lösungen durch Filtrierpapier unverändert filtrieren.

1) Vergl. über analoge Erscheinungen Ostwalds Lehrb. d. allgem. Chemie, Bd. I, S. 1085.

Anstellung der Beobachtungen.

Nach vollständiger Imbibierung des Filtrierpapiers resp. Kaolinzylinders kann ohne weiteres eine Messung der Riechkraft stattfinden. Man schiebe den Magazinzylinder ein wenig über das Riechrohr vor, so daß ein Teil der Innenfläche unbedeckt bleibt, im selben Augenblick aspiriere man rasch und merke sich, ob man eine Geruchsempfindung bekommt oder nicht. Im positiven Falle frage man sich, ob es möglich ist, die Qualität des Riechstoffs anzugeben, wenn nicht, so blase man flüchtig durch und schiebe weiter aus, bis man eine qualitativ definierbare Empfindung bekommt. In letzterer Weise immer weiter schiebend, findet der Beobachter seine Erkennungsschwelle für die betreffende Lösung. Um genaue Resultate zu erhalten, hat man in der Olfaktologie mit Erkennungsschwellen und nicht mit Reizschwellen zu arbeiten[1]), und umgekehrt auch aus der zur Erkennungsschwelle benötigten Zylinderlänge die relative Riechstärke der Lösung abzuleiten.

Alle Aspirationen sollen durch die vordere Hälfte des Nasenloches stattfinden, weil die aus der Innenröhre kommende Luft bekanntlich sonst nicht in die Riechbahn gelangt. Der hintere Teil des Nasenloches wird jedoch nicht verschlossen, um die natürlichen Verhältnisse beim Riechen nicht zu stören.

Wenn man bei einer gewissen Stellung des Apparates eine deutliche Empfindung erhalten hat, muß der Versuch wiederholt werden, denn es wäre möglich, daß man nur deswegen einen Geruchseindruck bekommen hat, weil etwas vom am Glase des Riechrohres adsorbierten Riechstoff sich dem gemessenen zugesellt hat. Zu diesem Zwecke soll das Riechrohr gereinigt werden. Am bequemsten geschieht dies durch Durchleiten von Luft mit Hilfe einer kleinen Bunsenschen Aspirationspumpe. Für gewöhnlich genügen einige wenige Minuten, eine Zwischenzeit, welche übrigens doch auch erwünscht ist, zur vollständigen Erholung des Sinnes. Man überzeuge sich von der vollständigen Geruchlosigkeit des Riechrohres, schiebe bis zur früheren Stellung vor und merke sich, ob wieder eine zur Empfindung hinreichende Duftmenge da ist. Wenn dies der Fall, ist man am Ziel und kennt die Riechkraft der Lösung, resp. die Geruchsschärfe des Beobachters.

Bei solchen Versuchen ist es angezeigt, den Zylinder in nicht zu kleinen Stufen vorzuschieben, um möglichst rasch zur Schwelle zu gelangen. Wenn schon bei 1 mm etwas von dem Dufte gespürt wird, empfiehlt es sich, den Versuch abzubrechen und zur weiteren Verdünnung der Riechstofflösung überzugehen.

Beispiele von Reizschwellenbestimmungen.

I. Äther in gesättigter wässeriger Lösung, Papierzylinderchen mit Metallgaze als Stütze. Erkennungsschwelle bei 0,2 cm.

II. Kampfer in wässeriger Lösung, Papierzylinderchen mit Metallgaze als Stütze. Erkennungsschwelle bei 6 cm für eine Lösung 1 : 100000.

III. Cumarin in wässeriger Lösung, Papierzylinderchen mit Metallgaze als Stütze, 1 zu Million. Erkennungsschwelle bei 1 cm.
Ionon in wässeriger Lösung, Papierzylinderchen mit Metallgaze als Stütze, 1 zu Million. Erkennungsschwelle bei 1 cm.

1) Die Namen Reizschwelle und Erkennungsschwelle entnehme ich Ziehens Vorlesungen über physiologische Psychologie; Toulouse wählt für dieselben Begriffe die Worte „sensation“ und „perception“.

Iron in wässeriger Lösung, Papierzylinderchen mit Metallgaze als Stütze, 1 zu Million. Erkennungsschwelle bei 1 cm.

IV. Trinitrobutyltoluol in wässeriger Lösung 1:5000000 Kaolinzylinder. Erkennungsschwelle bei 0,4 cm.

Paraffinöse Lösungen.

V. Äthylbisulfid 1:10000. Erkennungsschwelle bei 0,2 cm. Kaolinzylinder.

VI. Pyridin 1:1000. Erkennungsschwelle bei 0,05 cm. Kaolinzylinder.

Guajakol 1:1440000. Erkennungsschwelle bei 1 cm. Kaolinzylinder.

Ch. Henry hat, von meinem Prinzip der übereinander schiebbaren Zylinder ausgehend, am 6. Februar 1892 in der Soc. de Biologie von einem Olfaktometer berichtet, worin der Riechstoff in gasförmigem Zustande durch den porösen Zylinder diffundiert. Die Theorie dieses Apparats hat zu sehr scharfen Diskussionen zwischen Henry und Paßy Veranlassung gegeben.

Fehlerquellen.

1. Wenn die metallenen, innen mit Kork bekleideten Endplatten des Magazinzylinders am Glasmantel und porösen Zylinder genau anschließen und von den Schrauben genügend zusammengepreßt gehalten werden, schließt der Magazinzylinder vollkommen und sickert nirgends etwas aus. Hat sich irgendwo ein Fehler eingeschlichen, wodurch der Apparat unvollkommen schließt, so soll der Fehler aufgesucht und verbessert werden, bevor man zu beobachten anfängt, da sonst die Umgebung unmöglich wirklich geruchlos sein kann, wie es für die richtige Ausführung einer Riechmessung unerläßlich ist.

Aus demselben Grunde ist auch unbedingt darauf zu achten, daß der Olfaktometer im 0-stande keinen Geruch abgibt. Geschieht dies, so verdünnt man die Riechstofflösung weiter[1]).

2. Wenn für alle Unterteile des Olfaktometers die richtigen Größenverhältnisse gewählt sind, paßt der Magazinzylinder genau um das gläserne Innenrohr, an dessen nach oben gekrümmten Ende man aspiriert. Gelegentlich kommt es jedoch vor, daß das gläserne Innenrohr etwas zu dünn ist und das Lumen des porösen Zylinders also nicht ganz genau ausfüllt. In diesem Falle kann man sich helfen, indem man an der Schirmseite des Magazinzylinders eine Verschlußplatte aus Waschleder anbringt, die von einem breiten Metallstreifen und zwei Schiebern kräftig angedrückt wird. Man fertigt sich die Verschlußplatte selbst an. Dazu wird in ein Waschleder ein glattwandiges Loch von etwa 6 bis 7 mm mit Hilfe eines Korkbohrers ausgeschnitten.

1) Wenn der Riechmesser im 0-stande, d. h. bei völlig eingeschobenem Zylinder, beim Aspirieren am Riechrohr eine, sei es auch schwache Geruchsempfindung hervorruft, kann man außer der weiteren Verdünnung der Riechstofflösung noch einen Kunstgriff anwenden, um zum Ziele zu kommen. Man kann der aspirierten, mit Riechstoff geschwängerten Luft im bekannten Verhältnis reine geruchlose Luft beimischen. Dies ist jedoch nicht zu erreichen, wenn man in natürlicher Weise am Riechrohr aspiriert, denn in diesem Falle verringert man die Strömungsgeschwindigkeit im Apparat im gleichen Maße, als man verdünnt, und das Endresultat ist dasselbe wie vorher. Der Zweck wird nur erreicht, wenn man die Aspiration in künstlicher Weise zustande bringt, dabei den Strom durch ein 50 ccm fassendes Riechfläschchen führend, und nachher verdünnt (Archiv f. Physiol. 1903, S. 48).

3. Man soll, um der Ermüdung möglichst vorzubeugen, mit schwachen Reizen anfangen und erst allmählich zu stärkeren übergehen. Die Art und Weise der Atmung ist bei Schwellenbestimmungen ohne nennenswerten Einfluß, wenn man dem Beobachter nur volle Freiheit läßt, sie nach Belieben auszuführen. Er sucht dann, unwillkürlich und unbewußt, die günstigsten Meßbedingungen auf. Bei anderen als Schwellenbestimmungen soll man genau darauf achten, wie aspiriert wird. Es soll vorsichtig schnüffelnd geschehen, ungefähr wie man an einer Blume oder an einem schwach riechenden chemischen Präparate riecht („flairer"). Bei sehr genauen Versuchen

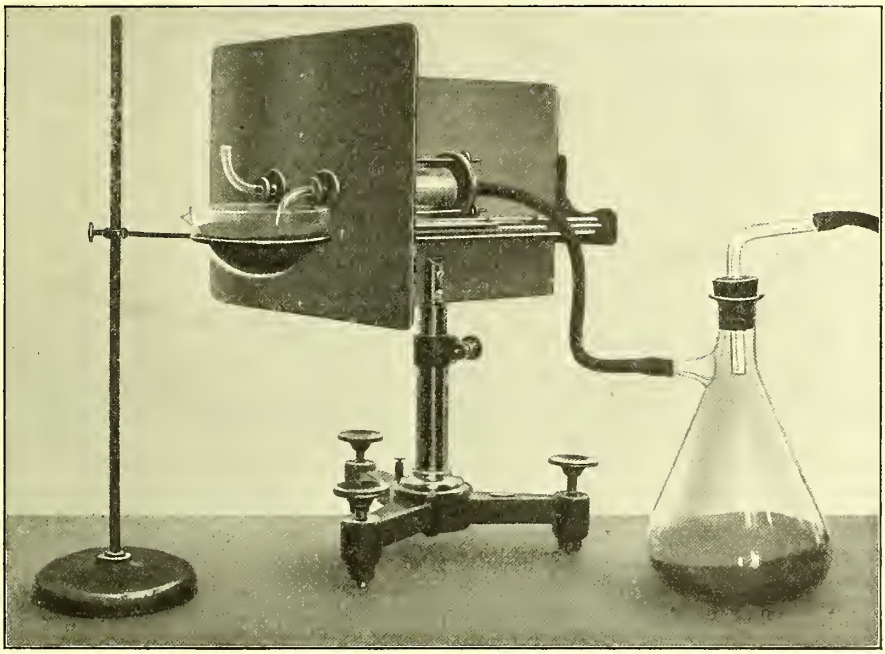


Fig. 6. Sandspülverfahren.

Das sonst nach oben abgebogene Riechrohr ist nach unten gedreht und in eine mit feinem Sande gefüllte Glasschale gesteckt worden. Seinem andern, vom Nasenloch distalen Ende ist ein Kautschukrohr aufgesteckt, das zur mit der Wasserleitung verbundenen Aspirationspumpe führt. Der Spülsand wird unterwegs von einer Filtrierflasche aufgefangen.

soll der Aspirationsmodus registriert werden, wofür später (im Kapitel Reaktionszeit) eine einfache Methode angegeben wird.

4. Nach jeder Beobachtung ist das Innenrohr von dem adhärierenden Riechstoff zu reinigen. Je stärker der Reiz war, desto schwieriger ist diese Aufgabe. Nach schwachen Reizen genügt es, etwas Luft hindurchzublasen. Daß während dieser Prozedur der olfaktometrische Zylinder vollständig eingeschoben sein muß, ist selbstverständlich, da sonst die kapillare Schicht der riechenden Lösung, die als Geruchsquelle dient, der Verdunstung zu sehr ausgesetzt ist. Wenn sehr stark riechende Luft durch das Innenrohr hindurchgegangen ist, ist es empfehlenswert, das Riechrohr mit in Alkohol

angefeuchteter Watte (an einem biegsamen Rotkupferdraht) leicht auszuwischen und nachher mit Hilfe einer kleinen Wasserluftpumpe während einiger Zeit Luft durchzusaugen. Für fest haftende Gerüche genügt dies jedoch nicht. Die Riechstoffe, um welche es sich handelt, sind für gewöhnlich wenig löslich. Es hilft also wenig, mit Wasser auszuspülen und nachher mittels Luftstrom zu trocknen. Was jedoch Wasser nicht zu leisten vermag, läßt sich mit Hilfe eines reibenden Pulvers erreichen. Man führt mit Hilfe der Wasserstrahlpumpe einen Pulverstrom hindurch. Von Pulvern, welche angewendet wurden, bewährte sich einfacher gewöhnlicher Sand, der durch Schlammen von gröberen Beimischungen befreit war (Fig. 6).

Die Durchspülung des Riechrohres läßt sich bequem ausführen, wenn man den olfaktometrischen Zylinder vollständig einschiebt, so daß derselbe das Riechrohr bedeckt, mit Ausnahme eines ganz kurzen Stückes, welches aus der vom Experimentator abgewendeten Seite des Instruments hervorragt. Man dreht ferner das Innenröhrchen innerhalb seiner Befestigung im Schirm um 180° in der Weise, daß sein abgebogenes Ende, das sonst in die Nase eingeführt wird, jetzt nach unten sieht und in den in offener Schale bereit gehaltenen Sand gesteckt werden kann. Verbindet man nun das Ende des Innenröhrchens mittels eines Kautschukrohres mit der Wasserstrahlluftpumpe, so kann der Sand hindurchgeleitet werden. Nur ist selbstverständlich noch irgendein Behälter zum Auffangen des austretenden Sandes zwischenzuschieben. Je nach Bedarf läßt man bis zu einem Kilo Sand durchströmen. Wenn anzunehmen ist, daß die adhärierenden Riechpartikelchen entfernt seien, so reinigt man das Glasrohr von noch zurückgebliebenen Sandkörnern. Indem man den negativen Druck im Behälter durch Zuhalten der Kautschukverbindung an passender Stelle ansteigen läßt, bekommt man beim Lösen des Verschlusses einen kräftigen Luftstrom, der auch die letzten Sandreste wegschafft. Einige Minuten einfacher Durchströmung mit Luft beendigen die Prozedur, um den eigentümlichen Steingeruch des Sandes zu beseitigen. Die Stelle des Innenröhrchens, welche mit dem Kautschuk in Berührung war, soll schließlich mit Watte abgewischt werden, damit auch an diesem Teil des Apparats kein störender Geruch haften bleibt. Wenn die Vorderfläche des Zylinders noch einen solchen zeigt, wird dieselbe mit einer dünnen Schicht Watte bedeckt, wobei die Verschlußschrauben als Stütze dienen.

Theorie des Olfaktometers.

Die Intensität des von einem Riechmesser hervorgerufenen Reizes hängt, wenn man von der Eigenart der riechenden Substanz absieht, von zwei Faktoren ab:

1. von der Länge, über welche der olfaktometrische Zylinder vorgeschoben wird,
2. von der Geschwindigkeit der den Apparat durchströmenden Luft.

Was ersteres angeht, lassen die üblichen Apparate einen Wechsel der vorgeschobenen Länge von 0 bis 99 mm zu[1]). Die Weite des olfakto-

1) Dem olfaktometrischen Zylinder eine größere Länge als 10 cm zu geben, ist wegen des dann entstehenden Röhrenwiderstands nicht empfehlenswert.

metrischen Zylinders ist bei allen Riechmessern 0,8 cm, also ist der innere Umkreis 2,5 cm; demnach kann die zylinderförmige riechende Fläche von 0 bis zu fast 25 qcm wechseln. Was den zweiten Faktor betrifft, ist es klar, daß man in sehr verschiedener Weise die Luft über die riechende Fläche hinziehen kann. Faktisch legt man sich jedoch bei Schwellenbestimmungen eine gewisse Einschränkung auf.

Im allgemeinen wird es, um eine kräftige Geruchsempfindung zu bekommen, vorteilhaft sein, äußerst langsam zu aspirieren. Die Luft ist dann lange mit der riechenden Oberfläche in Berührung und pro Volumeinheit häufen sich möglichst viele riechende Teilchen in ihr an. Sobald man jedoch in dieser Richtung übertreibt, so schlägt der Vorteil in einen Nachteil um. Die so sorgsam mit Riechstoff geschwängerte Luft kann nicht hoch genug in die Nasenhöhle hinaufgeführt werden und die Riechspalte gar nicht erreichen. Statt einer kräftigen Reizung wird nun überhaupt keine erhalten. Die Skylla des zu rasch und die Charybdis des zu langsamen Aspirierens sollen beide gemieden werden.

In einem konkreten Falle sind dabei ausschlaggebend:

1. die individuellen anatomischen Verhältnisse,
2. die physikalischen Eigenschaften der riechenden Substanz, sowohl dem Lösungsmittel als den Glaswänden gegenüber.

Durch erstere wird die Höhe bestimmt, bis zu welcher die Strömung gelangen wird, und durch letztere ist die Luftgeschwindigkeit festgelegt, die an sich die günstigsten Meßbedingungen hergeben würde.

Bei jeder Schnüffelbewegung werden nach mit Gads Atemvolumschreiber angestellten Versuchen im Mittel 30 ccm Luft eingezogen. Eine solche Aspiration hält nach einer anderen graphischen, im Paragraphen über Reaktionszeit näher zu schildernden Methode im Mittel 0,29 Sekunden an. Es läßt sich hieraus berechnen, daß die Luft im Olfaktometer zu gewöhnlichen Schwellenbestimmungen mit einer Geschwindigkeit von ± 100 ccm pro Sekunde fortbewegt wird.

Aus diesen Überlegungen folgern wir, daß

$$\text{Reizgröße} = \text{Konstante} \times \frac{\text{Zylinderlänge} \times \text{Umkreis der duftenden Fläche}}{\text{Lufttransport pro Sekunde}}.$$

Die von der Eigenart der riechenden Substanz abhängige Konstante habe ich früher „odorimetrischen Koeffizient“ genannt. Sie läßt sich empirisch bestimmen durch Vergleichung der mit dem konkreten Riechmesser gefundenen normalen Reizschwelle, mit der an einem Kautschukriechmesser festgestellten normalen Reizschwelle. Letztere entspricht zufällig einer vorgeschobenen Zylinderlänge von im Mittel 1 cm, was die Rechnung bedeutend erleichtert.

Es hat sich schließlich als praktisch herausgestellt, dem normalen Schwellenwert eines Geruchsreizes bestimmter Qualität einen eigenen Namen zu geben. Wir nennen ihn „Olfaktie“. Man findet eine Olfaktie mehr oder weniger genau, indem man an mehreren Tagen an einem normalen Geruchsorgan die Reizschwelle in Zentimeter vorgeschobener Zylinderlänge des Olfaktometers bestimmt und aus den gefundenen Werten entweder das arithmetische Mittel zieht oder, was bequemer ist, den häufigsten Wert auf-

sucht. Je größer die Anzahl Messungen ist, um so genauer entspricht eine solche Zahl dem wirklichen Wert. Zu einer ersten Annäherung genügen bereits 10 Bestimmungen, an verschiedenen Tagen und bei Temperaturen von ungefähr 15° angestellt. Die in dieser Weise bestimmte Schwelle oder Olfaktie läßt sich dann des weiteren als Einheit des Reizes verwenden.

Die Berechtigung einer solchen Verwendung der Olfaktie als Einheit bei der physiologischen Bemessung eines Geruchreizes entnehme ich der bekannten Fechnerschen Formel $e = k \log \frac{r}{b}$, in welcher e die Empfindungsstärke, k eine Konstante, r die Reizstärke und b die Schwelle des Reizes angibt. Eine Reizstärke in Olfaktien ausgedrückt, entspricht offenbar dem Wert $\frac{r}{b}$, dessen mit einer Konstante multiplizierter Logarithmus das Maß der Empfindungsstärke bedeutet. Überall, wo es auf Intensitätsvergleichungen von Reizen in physiologischer Hinsicht ankommt, mit anderen Worten, wo die ungefähre Gültigkeit des Weberschen Gesetzes vorausgesetzt werden kann, ist infolgedessen die Messung nach Olfaktien am Platz.

Man hat sich gelegentlich an der Tatsache gestoßen, daß die Olfaktie, wie eine Schwelle überhaupt, nicht ohne Heranziehung eines Sinnesorgans reproduziert werden kann. Es liegt hier ein Mißverständnis vor. Die „Olfaktie“ entspricht der Reizschwelle eines normalen Geruchsorgans und zwar für jede riechende Substanz gesondert. Es gibt eine Olfaktie Kampferduft, eine Olfaktie Chloroformduft, eine Olfaktie Iononduft usw., aber nie eine Olfaktie ohne weitere Andeutung der Qualität des reizenden Duftes. Auch ist die Schwelle eines normalen Geruchsorgans an sich keine umschriebene physikalische Größe. Sie entspricht einer solchen nur unter ganz bestimmten Bedingungen. Diese Bedingungen aber lassen sich festlegen, wie der nächste Paragraph über die Präzisionsmessung zeigen wird. Und dann ist die Olfaktie, wo nötig, reproduzierbar.

So hohen Anforderungen entspricht unsere oben vorgeschlagene Standard-Olfaktie (die Olfaktie des Kautschuks) nicht. Sie hat dagegen ihren praktischen Vorteil. Ohne Zeitverlust in jedem Laboratorium herzustellen ist die ihr entsprechende Zylinderlänge verhältnismäßig wenig von der Temperatur der Umgebung abhängig und ermüdet den Geruchssinn fast gar nicht. Auch die Riechkraft der im Handel vorhandenen neuen Kautschukrohre ist nicht gerade sehr wechselnd. Meine Bestimmungen aus den Jahren 1888 bis 1890 entsprechen, sowohl was den Mittelwert als was den häufigsten Wert angeht, genau jenen Griesbachs aus dem Jahre 1897, d. h. in beiden Fällen wurde als häufigster Wert 0,7 cm, als Mittelwert 1,0 cm Zylinderlänge gefunden.

Aber auch jeder andere Stoff läßt sich zur Herstellung einer Standard-Olfaktie verwenden und dann ist es selbstverständlich, daß man bei genaueren, in aller Strenge durchgeführten Versuchsreihen einen chemisch reinen Körper wählen wird, und zwar in einem Magazinzylinder mit Porzellanzylinder unter vollkommener Festlegung der Versuchsbedingungen (Temperatur, Geschwindigkeit des Luftstroms usw. siehe den nächsten Paragraphen).

Präzisionsmessung.

Wenn man bei Benutzung des Olfaktometers in natürlicher Weise riecht, übt der Aspirationsmodus einen unberechenbaren Einfluß auf das Resultat aus. Dieser schwer zu beherrschende Faktor fällt aus, wenn man die Aspiration statt durch die Atmung durch eine Wasserstrahlluftpumpe oder durch einen Ventilator mit elektrischem Getriebe ausführen läßt.

Falls die Wasserleitung als Aspirationskraft dienen soll, verwendet man die gleiche Wasserstrahlluftpumpe, die auch bei der Luft- oder Sandreinigung des Apparats benutzt wird. Nur schalte man irgendeinen Luftmesser ein. Eine gewöhnliche Gasuhr würde hierzu genügen, wenn nur nicht bei jeder Viertelumdrehung eine kleine Unregelmäßigkeit im Luftstrom eintreten

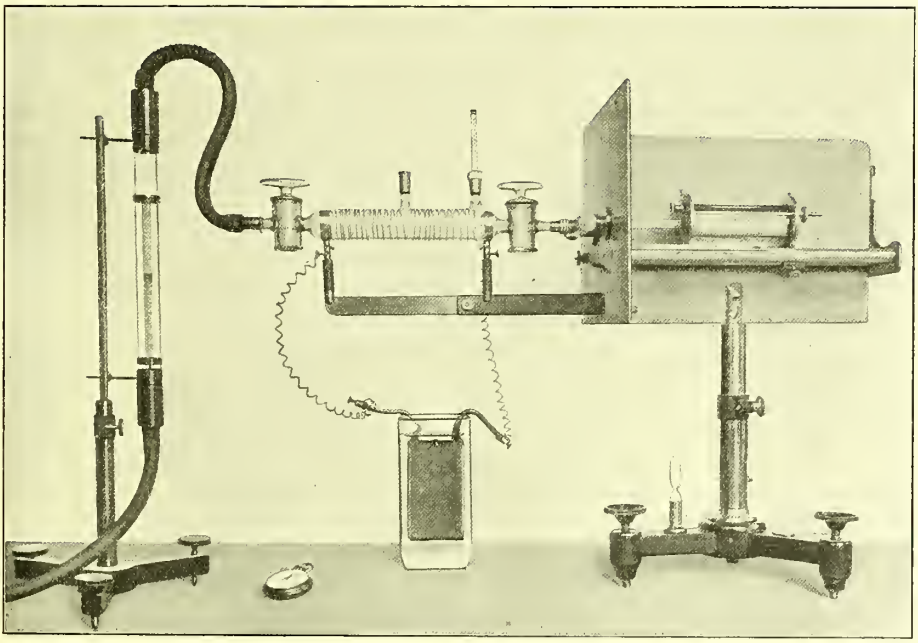


Fig. 7. Präzisionsolfaktometer.

Das Riechrohr des Olfaktometers wird in der Präzisionsolfaktometrie nicht unmittelbar zum Riechen verwendet, sondern setzt sich in einen 100 ccm fassenden, mit Hähnen versehenen und ferner in einen Aerodromometer, der die Aspirationsgeschwindigkeit angibt, fort. Der Behälter ist zur elektrischen Erwärmung mit Nickelindraht umwickelt. Auf dem Tische befinden sich Logglas ($^1/_4$ Minute), Rennuhr und Thermometer.

würde. Besser ist es einen einfachen kleinen Apparat zu benutzen, den ich als Aerodromometer beschrieben habe [1]).

In einem vertikalen Glasrohr ist zwischen zwei federnden Spiralfedern ein leichtes Aluminiumscheibchen aufgehängt. Um das Scheibchen herum bleibt innerhalb des Glasrohrs genau so viel Spielraum, als das Areal der Zugangsöffnungen oben und unten beträgt. Abbildung 7 zeigt den Apparat in $^1/_5$ der wahren Größe. Er wird mittels

1) H. Zwaardemaker, Engelmanns Arch. f. Physiol. 1902, Suppl., S. 417; Ztschr. f. Instrumentenkunde 1908, S. 17.

eines mit Schrauben versehenen Fußes genau vertikal gestellt. Man überzeugt sich dann weiter, daß um die kleine von gleichlangen Federn in der Mitte der Röhre festgehaltene Aluminiumscheibe herum allseitig der gleiche Raum übrig bleibt und die Scheibe ohne Reibung auf- und abschwingen kann. Wenn die Federn genügend lang sind, wird sie von dem Luftstrom annähernd proportional mit der Geschwindigkeit desselben mitgeführt. Die Eichung läßt sich leicht ausführen. Sowohl ein großes Spirometer (sog. Waldenburger Apparat) als eine gewöhnliche Gasuhr eignen sich hierzu vorzüglich. Wenn man die Eichungsmessungen in ein Koordinatensystem einträgt, z. B. die pro Sekunde transportierte Luftmenge auf der Abszisse und die Ausschläge als Ordinate, so zeigt sich eine vollständig lineale Beziehung, d. h. vollständige Proportionalität zwischen transportierter Luftmenge und Ausschlag.

Falls man Elektrizität verwenden will, ist ein von einem Elektromotor getriebener kupferner Flügelventilator sehr dienlich. Wir verwenden eine ziemlich große Form und lassen sie auf den Luftinhalt eines meterlangen Blechkonus einwirken. An der Spitze des Konus schließt sich dann wieder Aerodromometer und Olfaktometer an (Fig. 7). Ein Lufttransport von 100 ccm pro Sekunde hat sich am besten bewährt.

Der vom Aerodromometer in seiner Geschwindigkeit gemessene Luftstrom (nach Lufttransport geeicht) hat bei den Präzisionsmessungen statt des Atemstroms die sich von der Innenfläche des odorimetrischen Zylinders lösenden Riechstoffmoleküle mitzuführen. Wenn der Strom nur eine beschränkte Zeit, z. B. $^1/_4$ Minute anhält, ist die Annahme erlaubt, daß die Verdunstung aus der freigegebenen riechenden Oberfläche konstant ist und der kontinuierliche Strom fortwährend pro Zeiteinheit die gleiche Menge riechender Moleküle mitschleppt. Von dieser Eigenschaft wird Gebrauch gemacht, indem man stromabwärts in der Strombahn einen ungefähr 100 ccm fassenden mittels Hähnen[1]) abschließbaren, leicht erweiterten Raum einschaltet; er dient als Gasbehälter, an welchem gerochen wird. In diesem Raume wird sich, solange die Durchströmung andauert, Luft befinden, die in einem bestimmten Grade mit riechenden Molekülen gesehwängert ist, und die Menge der letzteren wird bei einer gegebenen Strömungsgeschwindigkeit der Luft ausschließlich von der Größe der riechenden Oberfläche abhängen. Wenn man während der Durchströmung die Hähne schließt, bleibt die Luft im Behälter gefangen und nach Aussehaltung des letzteren aus der Strombahn ergibt sich die Möglichkeit, diese Luft mit dem Geruchsorgan auf Intensität und Qualität ihres Duftes zu prüfen. Man macht dies am besten, während der Behälter an Ort und Stelle bleibt. Nachdem man den vom Olfaktometer abgekehrten Hahn geöffnet hat, wird an dem mittels eines besonderen, von einem Metallstopfen verschlossenen, wandständig angebrachten, kleinen röhrenförmigen Riechröhrehen gerochen. Falls bei einer gegebenen Verdünnung der Riechstofflösung im Olfaktometer, bei einer gegebenen Strömungsgeschwindigkeit und bei einer gegebenen Ausdehnung der riechenden Oberfläche die Geruchsstärke der im Behälter zurückgebliebenen Luft sich als über der Schwelle liegend herausstellt, kann man den Reiz erniedrigen:

entweder durch weitere Verdünnung der Riechstofflösung im Magazinzylinder,

1) Man hüte sich beim Einfetten vor Fett, das auch nur den mindesten Geruch abgibt. — In Arch. f. Physiol. 1903, S. 48 habe ich eine Methode geschildert, wo man ohne Hähne auskommt. Die jetzt beschriebene ist aber bequemer und genauer.

oder durch Verkleinerung der riechenden Oberfläche,
oder endlich durch Verdünnung der Luft in dem mit Hähnen versehenen Behälter und Wiederanfüllung desselben mit reiner Luft.

Von diesen drei Hilfsmitteln, um zu schwächeren Reizen zu gelangen, ist der Verdünnungsgrad der Riechstofflösung aus Zweckmäßigkeitsgründen bereits festgelegt, bleibt also die Verkleinerung der riechenden Oberfläche und die Verdünnung der Luft im Behälter. Eine Luftverdünnung läßt sich ohne Schwierigkeit mittels der Wasserstrahlluftpumpe bis auf das 10fache herstellen. Durch neue Anfüllung mit reiner Luft, welche durch das „Riechröhrchen“ zu geschehen hat, und abermaliges Verdünnen erreicht man eine 100fache Verdünnung. Eine zweite Wiederholung dieser Prozedur gibt 1000fache Verdünnung usw. So kommt man rasch bis zur Schwelle. Einmal in ihrer Nähe, variiert man den Reiz durch Vergrößerung bzw. Verkleinerung der riechenden Oberfläche weiter, bis man, immer aufs neue die Luft im Behälter 10, 100, 1000fach verdünnend, die wirkliche Schwelle trifft. Die Änderung der Ausdehnung der riechenden Oberfläche findet, wie wohl nicht näher hervorzuheben, durch olfaktometrische Verschiebung statt.

Hat man am Behälter riechend eine zweifelhafte Empfindung bekommen, so empfiehlt es sich, die Luft zur Vergleichung noch weiter zu verdünnen. Wenn es sich wirklich um die Reizschwelle gehandelt hat, ist der Gegensatz zwischen dieser, gerade zuvor beobachteten Empfindung und der Empfindung der Geruchlosigkeit, die man jetzt erhält, geradezu auffallend.

Wie bereits früher hervorgehoben, arbeitet man in der Olfaktologie unverhältnismäßig sicherer mit Erkennungsschwellen als mit Reizschwellen Aber auch bei der Aufsuchung und Handhabung der Erkennungsschwellen hat man darauf zu achten, ob man mit der sogenannten oberen oder mit der sogenannten unteren Erkennungsschwelle zu tun hat. Erstere findet man bei aufsteigender, letztere bei absteigender Methode. Das arithmetische Mittel beider Reizwerte bildet die richtige Erkennungsschwelle.

Das die Luftverdünnung angebende Quecksilbermanometer soll in Millimetern ablesbar sein und während der Verdünnung nicht zu rasch ansteigen, um die Schließung des distalen Hahns im rechten Augenblick zu ermöglichen, d. h. im Momente, in welchem das Manometer den um ein Zehntel seines Betrages verringerten Barometerstand anweist.

Manchmal wird man bemerken, daß die Schwelle des augenblicklich normalen Geruchsorgans des Beobachters im Laufe eines Versuchstages auf $^2/_3$ oder die Hälfte zurückgeht. Die Ursache dieser Erscheinung liegt nicht in den Messungen, sondern in der Eigenart des Sinnesorgans, welches der Übung, oder wenn man lieber will der Bahnung, besonders zugänglich ist.

Falls man mit stark adhärierenden Riechgasen zu arbeiten hat, empfiehlt es sich, den Luftbehälter, in welchem die Verdünnungen stattfinden, leicht zu erwärmen, was am besten elektrisch erfolgt. Ich umgebe zu diesem Zwecke den, wie gesagt, gläsernen Behälter mit einer Nickelin-Drahtwickelung; ein von ein paar Akkumulatoren gelieferter Strom unterhält zeitweilig oder andauernd im Behälter eine leichte Wärme, die die Körpertemperatur nicht oder nur wenig übersteigen darf. In besonders schwierigen Untersuchungen kann man gleichzeitig auch innerhalb des Innenrohrs des Olfaktometers eine

Nickelinspirale anbringen lassen. Für gewöhnlich kommt man aber ohne dieselbe aus.

Regeln für die Ausführung der Präzisionsmessung.

1. Die nach Gewichtsprozenten abgemessene Riechstofflösung wird mittels eines kleinen Trichters in das ungefähr 50 ccm fassende Magazin des Magazinzylinders eingegossen, die Eingangsöffnung zugeschraubt und der ganze Zylinder, während einiger Stunden genau horizontal, bei nicht zu wechselnder Temperatur sich selbst überlassen. Dabei sorgt man durch ein eingeschobenes 8 mm dickes Glasstäbchen auch für vollständigen Verschluß der zentralen Bohrung. Nach Ablauf mehrerer Stunden darf man annehmen, daß das poröse Material, welches als Geruchsquelle zu dienen hat, vollständig durchtränkt worden ist.

2. Temperatur und Barometerdruck werden abgelesen und notiert.

3. Der Magazinzylinder wird auf das Geleise des Olfaktometers gestellt und über das Innenrohr desselben völlig eingeschoben.

4. Die Wasserstrahlluftpumpe oder der elektrisch getriebene Ventilator werden in Gang gesetzt und bei eingeschobenem Riechmesser die augenblickliche Stromgeschwindigkeit festgestellt.

5. Der Magazinzylinder wird 1, 2, 3 usw. cm vorgeschoben und im selben Moment ein Logglas (Sanduhr von $^1/_4$ Minute) in Gang gesetzt.

6. Nach $^1/_4$ Minute werden die beiden Hähne des Luftbehälters gleichzeitig geschlossen, der Magazinzylinder zurückgebracht und die Verbindung mit der Wasserstrahlluftpumpe bzw. Ventilator gelöst.

7. Nach Öffnung des der Wasserstrahlluftpumpe zugekehrten Hahnes, wird aufmerksam durch das Riechröhrchen am Behälter gerochen. Letzterer bleibt hierbei an Ort und Stelle.

8. Nach Notierung des Befundes wird auch der andere Hahn geöffnet, die Verbindung mit der Wasserstrahlluftpumpe bzw. Ventilator wiederhergestellt und ein kontinuierlicher Luftstrom zur Reinigung bis zur Geruchlosigkeit des Behälters durchgeleitet.

9. Wiederholung des Versuchs unter Verdünnung der Luft im Behälter.

10. Wiederholung des Versuchs unter Abänderung der Länge, bis zu welcher der Magazinzylinder ausgeschoben wird.

Statt von nach Gewichtsprozenten bestimmten Lösungen kann man von Mischungen im heterogenen Gleichgewicht Gebrauch machen. Als solche empfiehlt sich eine Mischung von Äther und Wasser. Man schichtet im Magazin des Olfaktometers selbst beide Stoffe aufeinander und wartet 24 Stunden. Dann bildet sich ein System mit 3 Phasen. 1. Wasser, in welchem ein wenig Äther aufgelöst. 2. Äther mit ein wenig Wasser darin gelöst. 3. Ein Gemisch von Äther und Wasserdampf.

Die der Reizschwelle entsprechende Gasdichte des Äthers sind wir imstande, mit Hilfe von einigen früher von D. Konowalow mitgeteilten Zahlen zu berechnen. Dort wird die Zusammensetzung unserer ersten flüssigen Phase auf 1 Wasser : $^1/_{10}$ Äther, jene der zweiten Phase auf 1 Wasser und 33 Äther angegeben und die Tension der dritten Phase auf 17,2 mm Hg-wasser und 429,8 mm Hg-äther bestimmt. Im Gewichte verhalten sich die Menge Wasser und Äther im Dampf wie 1 : 116. Die Verdampfung der Bestandteile findet bei der angegebenen und auch von uns festgehaltenen Temperatur (19,8°) im gleichen Verhältnis statt und wir haben also jetzt nur noch die Totalverdampfung bei kontinuierlicher Durchströmung von 5 zu 5 Minuten festzustellen, um hieraus ohne weiteres zu der im Momente der Schwelle verdampfenden Äthermenge zu gelangen.

Außer dem System Äther—Wasser gibt es nur noch drei andere Flüssigkeitsmischungen, die gegenwärtig zu einem ähnlichen Zweck herangezogen werden können. Die bisher bei Zimmertemperatur untersuchten Systeme, deren Kurve ein Maximum oder Minimum darbieten, sind die Mischungen Schwefelkohlenstoff—Chloroform, Äther—Schwefelkohlenstoff, Schwefelkohlenstoff—Alkohol. Vielleicht, daß auch noch eine Mischung zweier fester Stoffe in Betracht käme. Wenn man 50 Mol. % Naphthalin und Bromkampfer bei 40° (das Eutektikum) zusammensehmilzt, entsteht ein zur Herstellung von olfaktometrischen Gerüchen geeigneter Körper. Weder poröses Material noch Magazinzylinder sind dann nötig. Man kann die Masse ohne Schwierigkeit in der Form eines Zylinders mit 8 mm Bohrung gießen und einem Olfaktometer aufsteeken. Nur soll man einen derartigen riechenden Zylinder äußerlich mit Glas oder Metall abdecken, damit der Naphthalingeruch sieh nicht zu sehr in der Umgebung verbreitet.

Das System Äther—Wasser ist vollständig untersucht und die Dampfphase im Gleichgewicht genau bekannt. Die drei anderen Systeme verdampfen in einer dem Maximum entsprechenden Zusammensetzung als ein einheitlicher Körper, das letztgenannte System schmilzt als einheitlicher Körper, aber über seine Verdampfung ist nichts bekannt. Nichtsdestoweniger ist das Eutektikum ein ausgezeichneter Punkt in den Mischungsverhältnissen. Daher ist die ihm entsprechende Zusammensetzung auch immer leicht wieder zu finden und die Homogenität des Zylinders in allen Schichten vollkommen gesichert.

Das Äther—Wassersystem hat eine geruchlose und eine riechende Komponente, die übrigen Systeme sind aus zwei riechenden Komponenten zusammengesetzt. Vorläufig bietet dies noch eine Schwierigkeit, aber wenn die Olfaktologie die Mischungen und Kompositionen genügend durehgearbeitet hat, läßt sieh erwarten, daß sie manchmal solchen Systemen von zwei riechenden Komponenten den Vorzug geben wird. Die einfachen Stoffe der Chemie brauehen noch keine einfachen Riechstoffe für das Geruchsorgan zu sein. Es wäre sehr wohl möglich, daß eine Mischung dem physiologisch einfachen Reiz weit näher käme. Es existiert jedenfalls für die Physiologie gar keine Notwendigkeit, sich auf einfache Körper zu beschränken. Wir stellen nur die Anforderung, daß bei unseren Versuchen scharf definierte Substanzen zur Verwendung kommen.

Zu physiologischen Versuchen kamen in den letzten Jahren die in untenstehender Tabelle zusammengestellten Standardlösungen in Verwendung. Jede der neun Geruchsklassen ist dabei durch einen scharf definierten Riechstoff in paraffinöser Lösung und geeigneter Konzentration repräsentiert.

1°	Geruchsklasse,	Isoamylazetat	0,5 %	Lösung	in	Paraffinum	liquidum
2°	„	Nitrobenzol	5 %	„	„	„	„
3°	„	Terpineol	2,5 %	„	„	„	„
4°	„	Muskon	0,627 %	„	„	Myristinsäure	
5°	„	Äthylbisulfid	1 ‰	„	„	Paraffinum	liquidum
6°	„	Guajakol	1 ‰	„	„	„	„
7°	„	Valeriansäure	1 ‰	„	„	„	„
8°	„	Pyridin	1 %	„	„	„	„
9°	„	Skatol	1 ‰	„	„	„	„

Bereits hat eine Reihe wissenschaftlicher Beobachter an diesen Standardlösungen eine genügende Anzahl Minimumbestimmungen ausgeführt, um die Berechnung von Mittelwerten und wahrscheinlichen Fehlern zu gestatten (die Mittelwerte sind für jede Lösung und jeden Beobachter aus mindestens 10 Wahrnehmungen hergeleitet).

Minimum perceptibile in Zentimeter der Olfaktometerskala.

Riechstoff	Zwaardemaker alte Untersuchungsreihe	Zwaardemaker neue Untersuchungsreihe	Noyons	Kubo	Hermanides	Heringa	de Haan	Allgemeine Mittelzahlen
Isoamylazetat	0,23	0,20	0,30	0,24	0,30	0,40	0,35	0,29
Nitrobenzol	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,25	0,06
Terpineol	1,10	1,10	2,00	2,90	1,30	1,20	1,40	1,60
Muskon	0,15	0,15	0,30		0,20	0,30	0,20	0,22
Äthylbisulfid	0,015	0,015	0,005	0,004	0,012	0,020	0,110	0,012
Guajakol	0,30	0,30	0,25	0,50	0,50	0,60	1,90	0,62
Valeriansäure	0,03	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,07	0,04
Pyridin	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03
Skatol	0,002	0,003		0,0003	0,002	0,003	0,002	0,002

In einer Untersuchung über ein abweichendes Geruchssystem sind noch einige andere Riechstoffe herangezogen worden, worüber seitens Noyons, Kubo und mir ebenfalls bereits normale Mittelwerte vorlagen (vergl. Ztschr. f. Sinnesphysiologie Bd. 42, S. 210). Siehe Tabellen.

Minimum perceptibile in Zentimeter der Olfaktometerskala.

Klasse	Riechstoff in paraffinöser Lösung	Minimum perceptibile (Mittelwerte aus 10 Beobachtungen)
II	Borneol 1 %	0,0014
	Eugenol <2 %	1,6
	Safrol 3 %	1,125
	Citral 1 %	0,09
III	Ionon 0,0001 % in 0,5 % Azetanilidlösung in Wasser	0,625
	Heliotropin	1,98
VII	Cadaverin 0,1 %	0,001

Ob die Lösungen frisch hergestellt oder einige Monate lang aufbewahrt worden sind, macht zwar einigen, jedoch keinen großen Unterschied. Bloß die Pyridinlösung hat sich wenig haltbar erwiesen.

Mittelwerte in Zentimeter der Olfaktometerskala.

Beobachter Hermanides	Alte Lösungen	Neu hergestellte Lösungen
Isoamylazetat	0,3	0,3
Nitrobenzol	0,15	0,09
Terpineol	1,2	1,4
Muskon	0,2	0,2
Äthylbisulfid	0,11	0,09
Guajakol	0,20	0,27
Valeriansäure	0,04	0,035
Pyridin	1,1	0,04
Skatol	0.004	0,0025

Klinische Riechmessung.

Zur klinischen Olfaktometrie wird man möglichst einfache Riechmesser verwenden. Am denkbar einfachsten ist wohl der Grazzische Olfaktometer (1899 [1])) gestaltet, der aus nichts weiterem besteht als aus einer riechenden Fläche, die man mit einem durchlöcherten Papier bedeckt und in dieser Weise verschiedene Ausdehnungen erteilt. Es werden einige Riechpapiere angefertigt, indem man 5 cm lange und 5 cm breite Stückchen gewöhnlichen Fließpapiers aus einem Tropffläschchen mit 10 Tröpfchen einer 20 %-igen alkoholischen Lösung von Benzoësäure (aus Resina benzoës dargestellt) beschickt. Dann läßt man den Alkohol verdampfen und bewahrt das Papier in geschlossener Schachtel auf. Zur Bestimmung der Geruchsschärfe nimmt man eins der Riechpapiere heraus und bedeckt es mit einer Visitenkarte, in deren Mitte ein Loch ausgeschnitten ist. Die Versuchsperson riecht unter Anwendung eines kleinen Papptrichters (10 cm lang, 5 cm breit), welcher unmittelbar auf die durchlöcherte Visitenkarte gesetzt wird. Die Geruchsschärfe wird gemessen nach der Größe des Lochs in der bedeckenden Karte, mit andern Worten, nach der Größe der riechenden Oberfläche, die erforderlich ist, um einen eben noch wahrnehmbaren Geruchseindruck hervorzurufen. Zur Verwendung kommen 10 Karten mit Löchern, deren Durchmesser sukzessive von 0,5—5 cm ansteigt. Für einen normalen Geruchssinn genügt ein Loch von 0,5 cm und Grazzi stellte diese unter den Bedingungen seines Experiments 0,2 cm^2 messende Oberfläche, ohne weiteres dem Wert einer Olfaktie gleich. Die Methode würde übrigens durch Heranziehung durchlöcherter Metallplatten statt durchlöcherter Papiere, ohne der Einfachheit zu schaden, bedeutend zu verbessern sein.

1) v. Grazzi, 4. Ital. Kongr. f. Otolaryngologie. Rom. Oktbr. 1899.

Eine andere einfache, jedoch viel weniger rationelle Methode ist von Toulouse und Vaschide[1]) ebenfalls seit 1899 benutzt worden. Sie gehen von einer gesättigten Kampferlösung (1 : 1000) aus und fertigen durch sukzessive Verdünnung ungefähr 50 Verdünnungsstufen an, bis auf eine Lösung von 1 : 1000000 herab. Für jeden Verdünnungsgrad ist ein besonderes Fläschchen bestimmt, dessen Mundweite 1,7 cm mißt und in welchem 10 bis 15 ccm der Lösung sich befinden. Die Lösungen werden numeriert und der Reihe nach übersichtlich geordnet. Im ganzen soll man mit 52 Fläschchen arbeiten und deren Inhalt jede Woche erneuern. Zum Vergleich dient ein Fläschchen mit destilliertem Wasser. Der Untersuchte riecht ohne weiteres am Fläschchen und sucht die Grenzlösung auf. Nach dieser Methode haben die genannten Untersucher eine stattliche Reihe Untersuchungen angestellt und auch Ch. S. Myers[2]) hat sie mit Erfolg zu anthropologischen Bestimmungen in Torres Straits verwendet. In manchen Fällen wird sie wohl die einzig anwendbare Untersuchungsmethode sein, obgleich sie wie Myers hervorhebt, nie vollkommen richtige Resultate ergeben kann, weil ihr Grundprinzip nun einmal verfehlt ist.

Auch das Prinzip der übereinander schiebenden Zylinder hat in der klinischen Riechmessung seit 1888[3]), wo ich meinen früher beschriebenen einfachen Riechmesser mit festem Riechstoff und Holzschirmchen angab, vielfache Verwendung gefunden. Dabei hat, wie selbstverständlich, die Wahl des Riechstoffs den meisten Wechselungen unterlegen[4]).

Als olfaktometrischer Riechmesser diente anfänglich ein Stück eines gewöhnlichen Kautschukschlauchs mit einer Lichtung von 8 mm. Es soll ganz neu sein und darf nicht in der Nähe von riechenden Stoffen gelegen haben. Ein Rohr, welches, wenn auch nur ein einziges Mal zum Durchleiten von Leuchtgas, von Essigsäure oder Ammoniakdämpfen gedient hatte, ist für immer unbrauchbar geworden und daher zu verwerfen. Man wähle unter den neuen Rohren ein solches, welches einen deutlich reinen Kautschukduft abgibt. Nicht so sehr in Hinsicht auf die Qualität, als auf die Intensität des Geruchs wird man Unterschiede bemerken, welche größtenteils mit der Neuheit zusammenhängen. Hat man einen geeigneten Schlauch gefunden, so schneide man ein genau 10 cm langes Stück ab und schiebe dies in ein genau herumpassendes Glasrohr.

Das Glasrohr wird schließlich mit dem Kautschuk gleich abgeschnitten. Anfangs hatte ich eines der Enden des als Hülle dienenden Glasrohrs durch Schmelzen ein wenig zu verengern versucht, um das abgeschnittene Ende des Kautschuks mit einem schmalen Glasrand zu bedecken. Ich tat dies in der Absicht, zu verhindern, daß die in den Zylinder eingesogene Luft vor-

1) Toulouse et Vaschide, Soc. de biol. 13. Mai 1899 (und Revue de Méd. 1899, S. 895) sowie Castens Bulletin de Laryngol. etc. t. 4, 1901, S. 1.

2) Ch. S. Myers, The Reports of the Cambridge anthropol. exped. to Torres Straits vol. II, S. 171.

3) Man sehe für die genaue Handhabung des ursprünglichen, ganz einfachen Riechmessers: Physiologie des Geruchs. Leipzig 1895, S. 103.

4) Auch noch Vereinfachungen sind versucht worden: so Onodi, Arch. f. Laryng. Bd. 14, S. 185 und R. Stevani, Arch. ital. di Otologie vol. XVI, S. 301, 1905.

her mit Kautschukgeruch geschwängert werde. Bald ergab es sich aber, daß diese Komplikation nur so lange bestehe, als der Zylinder neu ist. Das freie abgeschnittene Ende verliert den Kautschukgeruch, sobald es einige Zeitlang in Gebraueh gewesen, weil es fortwährend mit der Außenluft in Berührung ist. Hierin liegt zugleich eine Warnung, den Riechmesser stets eingeschoben zu bewahren, so daß der Kautschuk nur wenige Sekunden, während eines Versuchs, der Luft ausgesetzt wird; sonst jedoch, wenn nicht im Gebrauch, wird der Kautschuk beständig durch das Innenrohr hermetisch abgeschlossen sein, und es kann dann nicht befremden, wenn er jahrelang seine Riechstärke behält.

Das Minimum perceptibile für ein normales Geruchsorgan liegt bei diesen Kautschukriechmessern gewöhnlich auf ungefähr 1 cm, um ein geringes mehr oder weniger, je nach der Art des Kautschuks, aus dem der Apparat zusammengesetzt wurde. Wärme und Kälte haben allerdings einigen, wiewohl nicht namhaften Einfluß.

Es wird in vielen Fällen wünschenswert sein, über einen Olfaktometer mit einem festen Riechstoffe, welcher einen bedeutend stärkeren Geruch abgibt, verfügen zu können. Ich bediene mich zu diesem Zwecke gewöhnlich eines Riechmessers, dessen olfaktometrischer Zylinder aus einem gleichteiligen Gemenge von Guttapercha und Gummiammoniacum besteht. Man schmelzt zur Anfertigung solcher Zylinder beide Pflanzensäfte zusammen und gießt die Mischung in eine weite Glasröhre, deren unteres Ende mit einem Kork geschlossen ist. Schon vorher trage man Sorge, diesen untersten Pfropf mit einem Bohrloch zu versehen, durch welches ein metallenes oder gläsernes Stäbchen von genau 8 mm Dicke gesteckt wird. Man entfernt später, nach erfolgter Abkühlung der Masse, sowohl Stäbchen als Kork und besitzt dann einen Zylinder von dem gewünschten Kaliber, welcher überdies noch mit einer gläsernen Hülse versehen und also unmittelbar als olfaktometrischer Zylinder zu gebrauchen ist. Er wird an den Enden in einer Länge von 10 cm glatt abgeschliffen. Der Geruch eines solchen Zylinders erinnert an jenen von Lakritzensaft und hat eine so starke Intensität, daß ein normales Geruchsorgan bereits einen Riechreiz empfängt, noch bevor der Zylinder ganz 1 mm vorgeschoben ist.

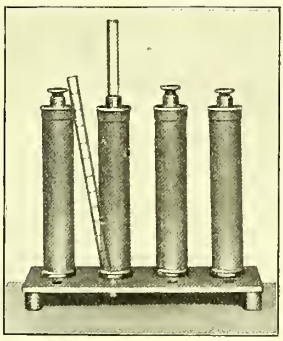


Fig. 8.
Kleines klinisches Besteck. Vier olfaktometrische Zylinder mit festem Riechstoff sind nebeneinander auf eine Grundplatte gestellt. Das Riechrohr ist ganz kurz, kann nicht eingeschoben, sondern muß aufgesteckt werden. Die riechende Fläche wird durch Unteneinstecken eines in cm geteilten, genau hineinpassenden Glasrohrs nach Bedarf verkleinert.

Dr. Reuter hat zur Zeit, als er die respiratorischen Anosmien untersuchte, das Verhältnis zwischen seinen Kautschuk- und Ammoniacum-Guttapercha-Riechmessern berechnet[1]) und fand, daß letztere bei gleicher Zylinderlänge einen 25 mal stärkeren Riecheindruck auslösten als jene von Kautschuk.

Manchmal bedarf man jedoch noch stärkerer Riechmesser. Als solcher wäre vielleicht der früher beschriebene Olfaktometer aus im Eutektikum zusammengeschmolzenem Naphthalin und Bromkampfer empfehlenswert. Bis jetzt kam es jedoch nicht zur Benutzung desselben. Sehr beliebt ist hingegen ein kleines Besteck (Fig. 8.) von vier Riechmessern, das außer einen Kautschuk- und einen Ammoniacum-Guttapercha-Olfaktometer einen solchen aus Asa foetida (50 % mit Dammarharz) und einen aus Ichthyol (50 % mit Bimsstein) enthält[1]).

1) C. Reuter, Zeitschr. f. klin. Medizin Bd. XII.

2) Bis jetzt verwendete man als intensivere Reize immer unscharf definierte Substanzen. Vgl. Zwaardemaker u. Reuter, Arch. f. Laryng. Bd. IV.

Zu sehr exakter Untersuchung pathologischer Fälle eignen sich in erster Linie wässerige Lösungen in mit Filtrierpapier hergestellten Magazinzylindern (s. oben S. 65).

Wässerige Riechstofflösungen.

Essigsaurer Isoamylester . . .	$1:10^4$	Schwelle bei	0,7	cm
Citral	$1:10^4$	„ „	0,2	„
Vanillin (in Glyzerin)	$1:10^3$	„ „	0,4	„
Trinitrobutyltoluol	$1: 5\times10^6$	„ „	0,5	„
Äthylsulfid	$1: 5\times10^3$	„ „	0,25	„
Pyridin	$1: 2\times10^3$	„ „	0,1	„
Valeriansäure	$1:10^4$	„ „	0,5	„
Skatolspiritus	$1:10^4$	„ „	0,4	„

Daneben kommen die früher angegebenen, bei der Präzisionsmessung zu verwendenden paraffinösen Lösungen in Betracht. Wenn die Zeit fehlt, alle neun Standardlösungen heranzuziehen, so empfehlen sich, vom rein theoretischen Standpunkt, aus später anzugebenden Gründen Terpineol, Guajakol und Valeriansäure.

Alle diese genaueren klinischen Beobachtungen sollen selbstverständlich nicht freiriechend, sondern mittels kontinuierlichen Aspirationsstroms und Einschaltung irgend-

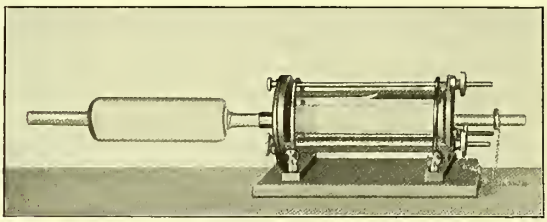


Fig. 9. Klinischer Magazinzylinder mit Riechfläschchen.

Dem Präzisionsmesser nachgebildet findet sich hier ein kleiner Glasbehälter (Riechfläschchen) als Verlängerung des Magazinzylinders aufgestellt. Die riechende Oberfläche wird durch Einschieben eines genau passenden Glasrohrs mit Zentimetereinteilung nach Bedarf verkleinert. Die Aspiration geschieht durch eine an der Wasserleitung angebrachte Aspirationspumpe.

eines Behälters, an welchem man riecht (siehe Präzisionsmessung), stattfinden. In der Klinik empfiehlt sich die in obenstehender Abbildung angegebene Anordnung, die an eine von der Wasserleitung getriebene Bunsensche Aspirationspumpe angeschlossen wird. Das in den Magazinzylinder geschobene Glasrohr trägt die Zentimeterteilung, an welcher man die Größe der freigegebenen riechenden Oberfläche abliest. Der Behälter (Riechfläschchen) kann leicht entfernt werden und wenn erwünscht dem Kranken in die Hand gegeben werden (Fig. 9).

Man wird in der Klinik keinen Fehler machen, wenn man die älteren und die nach vollkommenerer Methode bestimmten Olfaktienwerte promiscue benutzt. Im Vergleich mit den relativ kleinen Unterschieden, die von der Aspirationsverschiedenheit herrühren, sind die Schwellenwerte der pathologischen Fälle so riesenhaft groß, daß man erstere ohne weiteres vernachlässigen darf. Weisen doch auch schon die leichteren Grade von Anosmie eine Schwellenerhöhung bis auf das 25—250fache einer Olfaktie aus, während den mittelgradigen und schweren Anosmien Schwellenwerte von tausenden Olfaktien zukommen. Dies rasche pathologische Ansteigen des Minimum perceptibile des Geruchs braucht übrigens gar nicht zu verwundern. Bekanntlich gilt gleiches für alle Sinnesorgane, sobald es gelingt, die Intensität der Reize in einem wirklich physikalischen Maße auszudrücken. In unserem Falle fungiert als letzteres eine Verdampfungsfläche von gemessener Größe, die einem Luftstrom von konstanter gemessener Geschwindigkeit ausgesetzt ist.

Wie Herr Dr. C. Reuter mir mitgeteilt hat, werden im Kreise der Praktiker mit bezug auf die Ausführung der Olfaktometrie Schwierigkeiten empfunden, die ihrer allgemeinen Anwendung im Wege stehen. Der erste Übelstand ist der, daß ungebildete Patienten die verwendeten Riechstoffe nicht zu benennen wissen und noch weniger sie zu beschreiben verstehen. Zum Teil hängt dies mit der Wahl derselben zusammen, bei welcher man bestrebt ist, möglichst reine chemische Körper heranzuziehen. Nun sind die meisten in der Natur vorhandenen und dem Laien bekannten Riechstoffe sehr zusammengesetzter Art und es kann also nicht wunder nehmen, daß, wenn man statt der natürlichen Riechstoffe die chemisch reinen Verbindungen verwendet, der Kranke in Verwirrung kommt. Im allgemeinen wird ein Ungebildeter sich nicht so leicht aus dieser Verlegenheit zu retten wissen. Auch wenn man das sogenannte riechende Prinzip eines natürlichen Riechstoffs benutzt, hat es fast immer einen von dem zusammengesetzten Körper nach vielen Richtungen abweichenden Charakter. Es gehört gerade die lange Erfahrung und ganze Kunst des Parfümeurs dazu, um aus den von den chemischen Fabriken bezogenen riechenden Körpern ein wirkliches, dem natürlichen ähnliches Parfüm herzustellen. Dennoch möchte ich nicht gerne auch klinisch die Bedingung aufgeben, zu wissenschaftlichen Zwecken mit chemisch reinen Körpern zu prüfen. Es handelt sich also darum, die Wahl in der Weise zu treffen, daß es so viel wie nur irgend möglich gelingt, dem Wunsche, einen bekannten Riechstoff vorzuführen, gerecht zu werden. Wie mir scheint, ist dies vollständig gelungen für die oben angeführten Skatol- und Nitrobenzolzylinder. Beide Gerüche werden unmittelbar von jedem erkannt und, wenn auch nicht richtig benannt, dann doch mehr oder weniger genau beschrieben. Das Skatol, wenigstens in der Form, wie es in den chemischen Fabriken jetzt bereitet wird, ruft einen scheußlichen Fäkalgestank, das Nitrobenzol einen schönen Mandelgeruch hervor. Weniger gut, als die beiden erwähnten Zylinder, wird Äthylbisulfid wiedererkannt. Die Lösung hat unbestreitbar einen Allylgeruch, es gehört aber einige Übung dazu, um die Verwandtschaft mit den weit kräftiger riechenden Zwiebeln herauszufinden. Der Zylinder bleibt dennoch für die Klinik sehr wertvoll, weil die partiellen Anosmien der leichteren hysterischen Zustände für diese Klasse gelten und der typische Geruch der Klasse in der Lösung des chemisch reinen Äthylbisulfids ohne irgendwelche taktile Nebenwirkung zutage tritt.

Ein zweiter Übelstand, welchen die Ärzte empfinden, ist der, daß die Kranken manchmal, wenn sie mit dem Olfaktometer geprüft werden, jede Empfindung verneinen, während sie, am Fläschchen aspirierend, zu riechen angeben. Die Ursache dieses Paradoxons kann erstens darin liegen, daß in den Riechfläschchen sehr konzentrierte Lösungen oder auch scharfe Riechstoffe zur Verwendung kommen, welche neben einem olfaktiven einen taktilen Reiz hervorrufen. Und zweitens ist es möglich, daß mit dem Olfaktometer in ungeeigneter Weise manipuliert wird. Wie bereits oft erwähnt, kann keine Empfindung zustande kommen, wenn der Apparat in die hintere Hälfte des Nasenlochs eingesetzt wird. Dieser Fehler soll also jedenfalls vermieden werden, was nicht gerade leicht ist, wenn man versäumt, den Apparat dem Kranken selber in die Hand zu geben. Auch wird nicht immer mit schwachen Reizen angefangen, was jedoch unbedingt notwendig ist, da es eine ganze Reihe anosmischer Zustände gibt, wo die Empfindlichkeit des Geruchsorgans in verhältnismäßig geringem Grad herabgesetzt, die Ermüdbarkeit aber außerordentlich gestiegen ist; namentlich bei Influenza-Anosmien ist dies der Fall. Der Geruchssinn ermüdet dann ungemein rasch, so daß nach einigen Atemzügen sich vorübergehend vollständige Unempfindlichkeit ausgebildet hat. Die taktilen oder gustatorischen Empfindungen können dabei sehr wohl erhalten geblieben sein und sich unmittelbar geltend machen, wenn man zu einem Fläschchen Eau de Cologne, Essig, Chloroform, Äther greift. Man glaubt dann einer Geruchsempfindung auf die Spur gekommen zu sein, die nur scheinbar ist, wenn vorhanden, tritt eine hervor, wenn man in geduldigem Ausprobieren, mit schwachen Reizen anfangend, unter Einschiebung von kleinen Ruhepausen (2 oder 3 Minuten) und nicht zu tiefen Einatmungen wirklich olfaktometrisch prüft.

V. Unterschiedsschwelle, Reaktionszeit, Ermüdung.

A. Unterschiedsschwelle.

Zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle benutzt man einen Doppelolfaktometer mit zwei vollkommen gleichen Magazinzylindern armiert. Sie werden mit der gleichen Riechstofflösung beschickt, deren Konzentration am besten so gewählt ist, daß ein normales Geruchsorgan die Reizschwelle ungefähr bei $^1/_2$ cm findet. Auf einer Seite ist eine verschiebbare Arretierung angebracht, gegen welche der Zylinder anstößt, damit man rasch ausschieben kann, ohne genötigt zu sein, die Millimeterteilung am Geleise abzulesen. Dann wird abwechselnd am einen und am anderen Olfaktometer aspiriert und indem man den einen Zylinder gegen seine Arretierung anstoßen läßt, der andere so weit vorgeschoben, bis man einen leichten Unterschied (dem Zylinder mit festem Stand gegenüber) feststellen kann[1]). Von der Schwelle ausgehend, steigt man in dieser Weise mit raschen Stufen, bis man an den völlig ausgeschobenen Stand eines der Zylinder angelangt ist. Beabsichtigt man noch weiter zu gehen, so hat man zu höheren Konzentrationen überzugehen. Natürlich darf man dann jedoch nur solche Riechstoffe anwenden, die nicht die Eigenschaft besitzen, in konzentrierten Lösungen ihre verdünnt vorhandene Riechkraft zu verlieren.

Bekanntlich steigt die Empfindung nach dem Weber-Fechnerschen Gesetze in einer gewissen Breite dem Reize einigermaßen proportional an. Diese Strecke entspricht dem von Wundt sogenannten Kardinalwert des Reizes, in unserem Falle eine Reizintensität von 2,7 Olfaktien. Mit dieser Erscheinung hängt es wahrscheinlich zusammen, daß man olfaktometrisch am bequemsten arbeitet, wenn die Reizschwelle ungefähr bei 1 cm der Zylinderlänge liegt, was sich natürlich durch eine passende Verdünnung der Riechstofflösung leicht erreichen läßt. Denn wenn dies zutrifft, fällt der Bereich, in welchem man nach Wundt die objektiven Eindrücke am genauesten auffaßt, gerade in die Strecke des Olfaktometers, die am leichtesten meßbar ist.

J. Hermanides[2]) hat in meinem Institut für jede der früher genannten Standardlösungen die Unterschiedsschwelle bestimmt. Er findet (s. Tabelle S. 85):

B. Reaktionszeit.

Wenn man die Reaktionszeit für genau gemessene Riechreize zu bestimmen wünscht, bringt man am Olfaktometer knapp an der Stelle, wo das Riechrohr sich nach aufwärts biegt, ein T-förmiges Stück an. Dabei bildet das Riechrohr die Arme des T und der neu zugeführte Teil dessen senkrechten Stamm. Letzteren verbindet man durch einen Lufttransport mit einer auf einem Kymographen schreibenden Mareyschen Kapsel. Dann werden die Aspirationen, die im Riechrohre stattfinden, in ihrer Form, Tiefe und Dauer auf der berußten Fläche verzeichnet. Wenn ein elektrisches Signal auf dieser selben Fläche den Zeitpunkt der Empfindung markiert,

1) Nach Mc Culloch Gamble, The applicibility of Weber law to smell, Amer. Journal of Psychology Vol. X, Oct. 1898 liegt die relative Unterschiedsschwelle bei einer Intensitätsdifferenz von 35 und 30 %.

2) J. Hermanides, Über die Konstanten der in der Olfaktologie gebräuchlichen neun Standardgerüche. Inaug.-Diss. Utrecht 1909.

Unterschiedsschwellen.

Riechstofflösung	für schwächere Reize	für stärkere Reize
Isoamylazetat ½ %	30 %	24 %
Nitrobenzol 5 %	25 „	26 „
Terpineol 2,5 %	40 „	36 „
Muskon 0,627 %	45 „	46 „
Äthylbisulfid 1 ‰	30 „	36 „
Guajakol 1 ‰	35 „	46 „
Valeriansäure 1 ‰	45 „	38 „
Pyridin 1 %	30 „	30 „
Skatol 1 %	60 „	62 „
Im Mittel	38 „	38 „

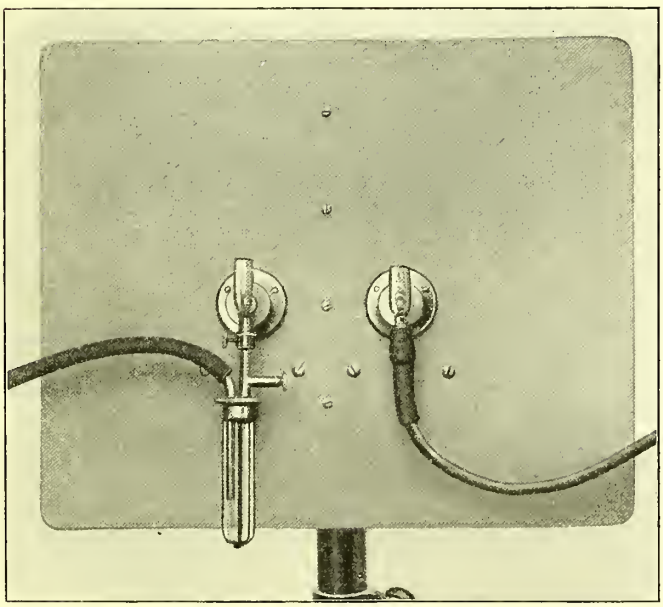


Fig. 10. Reaktionszeitmarkierung.

Zur genauen Verzeichnung des Augenblicks, in welchem, in gewöhnlicher Weise am Riechmesser aspirierend der Geruchsreiz abgegeben wird, ist am Riechrohr eine T Gabelung angebracht, die zu einer Mareyschen Kapsel führt. Die Gabelung ist aus Bleirohr hergestellt (rechts) oder enthält ein kleines Luftreservoir eingeschaltet (links).

ergibt eine chronoskopische Ausmessung der Distanz zwischen Aspiration und Signal unmittelbar die Reaktionszeit. Nur muß noch eine besondere Vorrichtung getroffen werden. Die Verbindung zwischen dem T und der Mareyschen Kapsel geschehe, entweder durch ein enges Bleirohr oder, falls man ein Kautschukrohr benutzt, unter Einschaltung eines ganz kleinen Luftbehälters (Fig. 10). Letzteren stelle man aus einem kleinen Fläschchen mit

doppelt durchbohrtem Korke her, worin man das T-förmige Stück oben einmünden läßt, während man das Luftverbindungsrohr bis nahe an den Boden führt. Die Luftmenge, welche während des Riechens aus dem Seitenstück in das Riechrohr übergeht, ist sehr gering und wird dem geruchlosen Fläschchen entnommen, während die hervorgebrachte Druckerniedrigung sich wie eine Welle nach der Mareyschen Kapsel fortpflanzt. Da die Reaktionszeit verhältnismäßig lang ist, braucht die chronoskopische Einrichtung nicht so besonders minutiös zu sein. Eine Stimmgabel oder Kagenaarsches Chronoskop von z. B. 25 Schwingungen genügt vollkommen.

J. Hermanides hat in meinem Institut für jede der früher genannten Standardlösungen die Reaktionszeit seines Sinnesorgans bestimmt. Er kommt zu den folgenden Resultaten, die ich hier angeben will, weil sie für die Beurteilung der Ergebnisse mancher anderen Riechmessungen von Bedeutung sind.

Reaktionszeit in Sekunden.

Riechstofflösung	Riechstärke in Olfaktien	Reaktionszeit in Sek.	Wahrscheinlicher Fehler
Isoamylazetat	5	0,58	9 %
„	10	0,50	13 „
Nitrobenzol	5	0,60	22 „
„	10	0,56	16 „
Terpineol	2 ½	0,67	13 „
„	5	0,65	3 „
Muskon	5	0,53	18 „
„	10	0,51	19 „
Äthylbisulfid	5	0,66	12 „
Guajakol	1 ½	0,68	11 „
„	3	0,67	5 „
„	5	0,45	12 „
„	10	0,42	11 „
Valeriansäure	10	0,42	13 „
„	20	0,48	16 „
„	40	0,49	10 „
„	80	0,52	18 „
Pyridin	5	0,54	9 „
„	10	0,50	8 „
Skatol	100	0,44	10 „
„	200	0,39	14 „

Als allgemeine Mittelwerte findet Hermanides eine Bruttoreaktionszeit von 0,54 Sekunden; von dieser fällt 0,02 Sek. auf die Fortbewegung der Luft im Riechröhrchen des Riechmessers, so daß als Nettoreaktionszeit 0,52 Sek. übrig bleibt.

C. Ermüdung.

Wünscht man die Ermüdung des Geruchsorgans[1]) vermittels genau abgemessener Geruchsreize[2]) zustande zu bringen, so bediene man sich

1) Aronsohn, l. c. (Berliner Inauguraldiss. 1886), auch im Arch. f. Physiol. 1886, S. 321.
2) Physiologie des Geruchs. S. 203.

eines olfaktometrischen Zylinders ohne Riechrohr. Einem der Enden wird ein kurzes Glasröhrchen von 8 mm Dicke und 5 mm Innenweite aufgesteckt und daran im Takt atmend, z. B. während man im Zimmer auf- und abgeht, dem Schritt folgend, gerochen. Nach Ablauf von 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120 usw. Sekunden wird schnell an einem mit einem genau gleichen Magazinzylinder armierten Olfaktometer die Geruchsschärfe bestimmt. Verzeichnet man die Resultate solcher in längeren Zwischenräumen wiederholten Versuche in einem Koordinatensystem, so entstehen in hohem Grade belehrende Ermüdungskurven.[1])

Die zu solchen Ermüdungsversuchen bereit gehaltenen Magazinzylinder fertige man am besten ganz aus Metall an und mache sie weniger volumi-

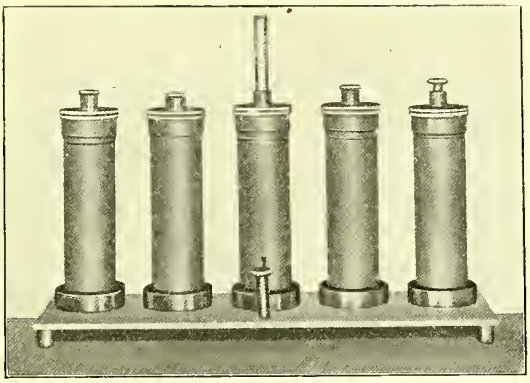


Fig. 11.
Besteck von 5 vertikal gestellten zu Ermüdungsversuchen bereit stehenden Magazinzylindern.
Das Riechrohr ist nur ganz kurz und wird anstatt eingeschoben, aufgesteckt. Die Magazinzylinder besitzen an der Stelle des Glasmantels einen solchen aus Metall und sind obgleich von 10 cm Länge weniger voluminös als die gewöhnlichen (poröse Porzellanröhre, Paraffinfüllung, hermetischer Schraubenverschluß). In der Zeit von vielen Wochen sickern infolge von Temperaturwechselungen einige wenige Tröpfchen aus, die auf einem kleinen Gitter in der Fußplatte von einer dünnen Wattenschicht aufgesaugt werden.

nös. Man stellt sie mit porösem Porzellan und Paraffinfüllung armiert, in vertikaler Stellung bereit. Die Aussickerung von Flüssigkeit ist in Wochen und Monaten unbedeutend (Fig. 11).

VI. Die Mischung von Gerüchen.

Die Mischung von genau gemessenen Geruchsmengen geschieht am Doppelolfaktometer. Zu diesem Zwecke ist ein ⊤ Stück beigegeben, mittels welches man die beiden Riechrohre in den gewöhnlichen mit Hähnen versehenen Luftbehälter zusammen einmünden lassen kann. Wenn letzterer mit der Wasserstrahlluftpumpe, bez. mit dem Ventilator in Verbindung gesetzt wird und die beiden Olfaktometer je eine bestimmte Anzahl Zenti-

1) Ebenda S. 205. Vaschide, Journal de l'Anat. et de la Physiol. 1902. S. 93. führt die Ermüdungskurve in sehr bezeichnender Weise als negative Ordinate auf.

meter vorgeschoben werden, so zieht durch das System eine gemessene Mischung der beiden Riechgase. Nach Abschluß der Hähne und Ablösung der Verbindung mit der Wasserstrahlluftpumpe kann man sich am Behälter riechend, von der Qualität und Quantität des vom Gemisch abgegebenen Geruchs überzeugen [1]) (Fig. 12).

Außerordentlich oft begegnet man bei solchen Versuchen der Erscheinung, daß keine Mischempfindung, sondern ein Wettstreit entsteht. Man spürt entweder die eine oder die andere Geruchsart, und zwar in mehr oder weniger abgeschwächtem Grade, d. h. weniger stark, als wenn eine der Komponenten für sich beobachtet wäre. Wenn man schwächere Riechreize verwendet, also solche die nur wenig über der Schwelle liegen, so ist es

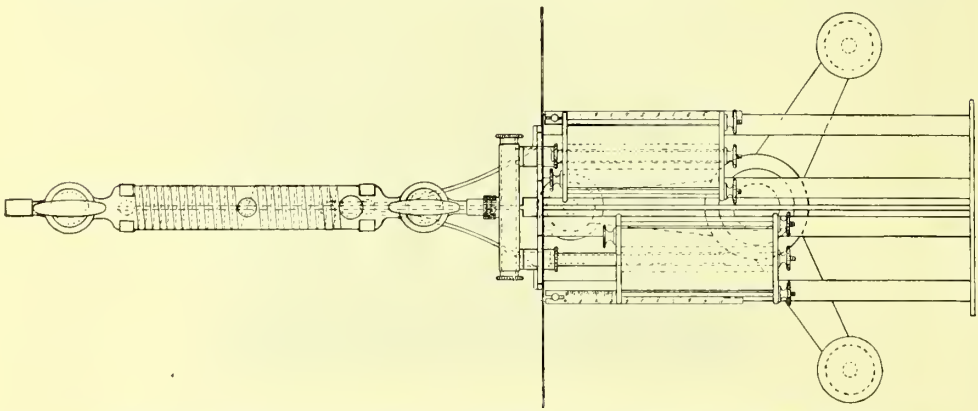


Fig. 12. Schema des Doppelolfaktometers zu Kompensierungsversuchen.
Die Riechrohre der beiden Magazinzylinder führen längs vollkommen symmetrischer Bahn zu einem gemeinschaftlichen Behälter, in welchem die Mischung der Düfte stattfindet. Es ist möglich den Querweg zu Vexierversuchen an einer oder beiden Seiten durch Einschrauben eines Stöpsels abzuschließen, ohne daß der Beobachter diese Abänderung der Versuchsbedingungen zu wissen braucht.

sogar möglich, die beiden Gerüche zum Verschwinden zu bringen. Beispielsweise geschah dies, wenn man Borneolgeruch und Skatolgeruch in den folgenden Verhältnissen zusammenmischt.

Das Borneol kam in einer 1%igen Lösung in konzentrierter Natriumsalizylatlösung zur Verwendung. Als eines Tages 1,6 ccm des Borneols mit 8 ccm des Skatols zusammengemischt wurden, erhielten 4 Beobachter in 4 unmittelbar nacheinander angestellten Versuchen eine unbestimmte nicht weiter zu deutende, der Empfindung der Geruchlosigkeit sich nähernde Sensation. Ein solches sich genau aufhebendes Zusammentreffen zweier Reize kann selbstverständlich nur durch geduldiges Ausprobieren gefunden werden.

Um sich vor Autosuggestion zu schützen, werden von Zeit zu Zeit Versuche eingeschaltet, wobei von einem Gehilfen in einer der Branchen des Zweigrohrs ein Metallstopfen eingesetzt wird. Äußerlich ist dies gar nicht sichtbar, während dennoch einer der Komponenten der Zugang vollkommen abgeschnitten ist.

1) Wegen der geringeren Strömungsgeschwindigkeit der Luft im olfaktometrischen Zylinder hat jede Komponente in einem solchen Gemisch die doppelte Stärke von der, die sie im Einzelzylinder, wenn gesondert durchströmt, besitzt.

Am bequemsten arbeitet man wieder, wenn die Reizschwelle sich für beide Stoffe ungefähr bei 1 cm des Olfaktometers befindet, denn in diesem Falle bewegt man sich in der Nähe des Kardinalwertes des Reizes. In jenem Bereich ist, falls p Olfaktien des einen Riechstoffs von q Olfaktien des anderen kompensiert werden, das gleiche für np Olfaktien der einen und nq Olfaktien der anderen zu erwarten. In allen anderen Strecken der Intensitätenskala trifft ein solches einfaches Verhältnis nicht zu.

In derselben Weise, wie man zwei Gerüche mischt, kann es auch mit drei Gerüchen geschehen. Hierzu wird über das Doppelolfaktometer noch ein dritter olfaktometrischer Zylinder aufgestellt und die drei Olfaktometer mittels eines gleicharmigen dreigabeligen Verbindungsstücks mit dem von Hähnen versehenen Behälter verbunden.[1]) Auch jetzt bekommt man meistens Wettstreit zwischen den Teilgerüchen und nur selten wirkliche Mischgerüche. Sogar eine vierfache Kombination kann versucht werden, wozu ein eigener vierfacher Riechmesser hergestellt wurde[2].)

Über die Bedeutung dieser Erscheinungen wollen wir uns hier nicht verbreiten, erlauben uns jedoch, zum Schluß eine graphische Methode anzugeben, welche geeignet ist, die Zusammenfassung des Ergebnisses solcher Versuche zu erleichtern.[3])

Bis jetzt sind in meinem Institut drei mehr ausgedehnte Untersuchungsreihen über Geruchskompensation durchgeführt worden, wobei die neun Standardgerüche in den ihnen zukommenden Kombinationen zwei zu zwei zusammengefügt wurden.[4]) In diesen Fällen wurde der Mischgeruch einer Seite des Sinnesorgans zugeleitet. J. Hermanides hat dazu noch eine Untersuchung vorgenommen über Geruchskompensation bei bilateraler Zuleitung, wenn der eine Riechstoff dem linken, der andere Riechstoff dem rechten Nasenloch zugeführt wird. Hierzu benutzten wir einen besonderen Riechmesser mit symmetrischen Gläsern (Duftbehältern). Der Apparat ist S. 83 der Inauguraldissertation unseres Autors abgebildet. Seine Resultate, die möglicherweise anderen Forschern zur Richtschnur sein können, mögen hier tabellarisch abgedruckt werden (s. S. 90).

Aus der Tatsache der Geruchskompensation geht die Notwendigkeit hervor, einen Geruchsreiz durch einen Vektor darzustellen, also eine Linie im Raum, an welcher sich Richtung und Größe unterscheiden lassen. Die Länge des Vektors entsprcehe der Intensität, seine Richtung der Qualität des Geruchs. Geruchsarten, die in allen Konzentrationen die gleichen bleiben (die überwiegende Mehrzahl der Riechstoffe), werden von graden Linien, die mit

1) Wegen der dreifach verringerten Strömungsgeschwindigkeit der Luft hat jede Komponente in einem solchen Gemisch die dreifache Intensität der gewöhnlichen.

2) Wegen der vierfach verringerten Strömungsgeschwindigkeit bekommen die einzelnen Reize die vierfache Intensität der gewöhnlichen, den exponierten Zylinderlängen entsprechenden Intensitäten.

3) Man vergleiche H. Zwaardemaker, About Odour-affinity, Kön. Akad. d. Wissenschaften in Amsterdam, 26. Juni 1909.

4) H. Zwaardemaker, Über die Proportionen der Geruchskompensation, Engelmanns Arch. f. Physiol. 1907, Suppl. f. 89.

J. Hermanides, Über die Konstanten der in der Olfaktometrie gebräuchlichen neun Standardgerüche. Inanguraldissertation Utrecht 1909.

H. Zwaardemaker, k. Akad. d. Wissensch. in Amsterdam 26. Juni 1909.

Bilaterale Kompensationen von 2 je zu einer Seite zugeführten Geruchsreizen.

Kombination p : q	Anzahl Olfaktien				Grad der Kompensation
	p rechts	q links	p links	q rechts	
Isoamylazetat und Nitrobenzol .	6,66	100	13,32	4,44	unvollkommene K.
„ „ Terpineol . .	7	1,3	7	0,65	Mischgeruch
„ „ Muskon . . .	2,67	1,3	1	20	fast vollkommene K.
„ „ Äthylbisulfid	14	8,88	14	8,9	schwacher Mischgeruch
„ „ Guajakol . .	5	29,6	5	4,4	„ „
„ „ Valeriansäure	10	80	84	80	großeKompensationsbreite
„ „ Pyridin . . .	10	24,4	30	7,3	Wettstreit
„ „ Skatol	2,33	1000	5	200	vollkommene K.
Nitrobenzol und Terpineol. . . .	22,22	26	50	0,5	fast vollkommene K.
„ „ Muskon	4,44	20	5,55	40	unbestimmt
„ „ Äthylbisulfid. .	66,67	19	66,67	16,6	schwacher Geruch
„ „ Guajakol	6,67	10	44,4	20	unsicher
„ „ Valeriansäure .	24,44	100	22	3,5	fast vollkommene K.
„ „ Pyridin	6,67	24,4	6,67	17,5	unbestimmt
„ „ Skatol.	17,78	1000	3,33	400	fast vollkommene K.
Terpineol und Muskon	1,22	11	0,72	11	undeutlich
„ „ Äthylbisulfid . . .	1,4	33,33	5	55,5	Wettstreit
„ „ Guajakol	2,5	1,85	2,5	1,11	unsicher
„ „ Valeriansäure . .	0,86	200	2,5	51,4	unbestimmt
„ „ Pyridin	7	24,4	7	21,9	Wettstreit
„ „ Skatol	1,2	1000	3	400	unbestimmt
Muskon und Äthylbisulfid	10	4,4	20	3,3	Wettstreit
„ „ Guajakol	10	3,3	20	5,55	unsicher
„ „ Valeriansäure . . .	20	28,6	20	34,29	„
„ „ Pyridin	20	39,98	20	29,9	unbestimmt
„ „ Skatol	20	480	20	120	fast vollkommene K.
Äthylbisulfid und Guajakol . . .	60	56	60	74	unbestimmt
„ „ Valeriansäure	20	57	20	43	„
„ „ Pyridin	50	36,6	50	24,4	Wettstreit
„ „ Skatol	11	1000	17	1000	unbestimmt
Guajakol und Valeriansäure. . .	1,8	100	3,7	200	unsicher
„ „ Pyridin	20	32	20	1,95	Mischgeruch
„ „ Skatol	10	240	20	320	unbestimmt
Valeriansäure und Pyridin . . .	200	17	200	19,5	Wettstreit
„ „ Skatol	200	480	200	240	schwacher Mischgeruch
Pyridin und Skatol	100	480	49	120	fast vollkommene K.

der Konzentration ihren Charakter ändernden Gerüche (Antranilsäureäthylester, Ionon) werden von gekrümmten Linien dargestellt. Unter sich verwandte Gerüche werden Bündel von Vektoren bilden, unter sich verschiedene Gerüche weitausspreizende Vektoren, wenn man, was erlaubt und empfehlenswert, den Vektoren einen gemeinsamen Ausgangspunkt gibt.

Die Mischung von Gerüchen wird nun selbstverständlich durch Addition von Vektoren angegeben werden. Sind die Gerüche identisch, wie z. B. jene

von Kampfer und Borneol, so wird die Vektorsumme einfach eine den beiden ursprünglichen Vektoren zukommende gemeinschaftliche Richtung und eine der Summe von beiden entsprechende Länge besitzen. Sind die Gerüche nicht identisch, sondern verwandt, so wird die Vektorsumme nur wenig in Richtung und Länge von der im vorigen Falle behandelten abweichen. Durch eine zwar umständliche, aber jedenfalls ausführbare Reihe von Versuchen ist es nun möglich, die Richtung und die Summe genau kennen zu lernen. Zu diesem Zwecke braucht man nur die tatsächlich der Mischung unterworfenen Geruchsreize vor und nach der Mischung nach ihrer Intensität zu bestimmen und die in dieser Weise gewonnenen Resultate als Vektoren geometrisch zusammenzustellen. Die Länge eines jeden Vektors soll in diesen und allen ähnlichen Fällen nach Olfaktien oder nach der Anzahl zur Erreichung der Reizstärke durchschrittenen Unterschiedstreppen, mit anderen Worten logarithmisch, bemessen werden. Vorläufig kann man die Intensität eines Reizes, also auch die Länge des ihm entsprechenden Vektors in Olfaktien angeben und nach diesem Maßstabe die Raummodelle zusammenstellen. Es haben bisher zwei systematische Versuche stattgefunden. In erster Linie geschah es für mein eigenes rechtes Geruchsorgan und später wurde es mit großem Erfolg von Hermanides unternommen. Eine Vergleichung der Ergebnisse und eine Prüfung der den beiden Untersuchungsreihen gemeinschaftlichen Resultate bei einem dritten Beobachter, Herrn Assistenten des Instituts Heringa ergab ein besonderes Hervortreten dreier bestimmter Gerüche: Terpineol, Guajakol, Valeriansäure. Die drei Riechstoffe üben, als Geruchsreize verwendet, auf den Sinn-Bewußtsein-Komplex dreier geübter, unabhängig voneinander wahrnehmender Beobachter den gleichen und nämlichen Einfluß aus. Es wäre deshalb der Überlegung wert,

Terpineol
Guajakol
Valeriansäure

vorläufig in den Vordergrund der physiologischen Olfaktologie zu bringen.

VII. Die schmeckbaren Stoffe.

Wie auf verwandtem Gebiete äußert sich auch in der Geschmacksphysiologie das Bestreben, in den Versuchen nur auf reine und chemisch genau definierbare Stoffe bezug zu nehmen. Diese Schmeckstoffe im engeren Sinn sind größtenteils in Wasser leicht löslich und leicht diffusibel. Dabei sind es verhältnismäßig einfache chemische Körper, denn hoch-molekulare Verbindungen sind geschmacklos[3]). Soweit sie anorganischer Natur sind, enthalten die Schmeckstoffe, wie es scheint, immer einige wenige Elemente, denen im periodischen System ein bestimmter Platz zukommt[4]). Wenn sie

1) H. Zwaardemaker, Die vektorielle Darstellung eines Systems von Geruchskompensationen. Engelmanns Arch. f. Physiol. 1908 p. 52. (Über einen Rechenfehler in diesem Aufsatz siehe k. Akad. d. Wissensehaften in Amsterdam, Sitzung vom 26. Juni 1909, Protokoll in engl. Sprache S. 96.)

2) J. Hermanides, l. c., Inauguraldissertation 1909 S. 60.

3) Hayeraft, Brain, vol. X, S. 149.

4) Haycraft, l. e. Sternberg, Verhandlungen der Physiol. Gesellschaft zu Berlin, 14. November 1902.

hingegen zu den organischen Körpern gehören, werden eigentümliche sapiphore Atomengruppen angegeben [1]) oder auf bestimmte Beziehungen zwischen denselben hingewiesen [2]).

Mit Rücksicht auf die Versuchstechnik teilen wir die Schmeckstoffe am besten sinnesphysiologisch ein. Die zahlreichen Gruppen älterer Autoren sind jedoch gegenwärtig aufgegeben und auf Mischempfindungen mit anderen Sinnesempfindungen zurückgeführt. Ja in der Neuzeit haben sich nur die vier qualitativ scharf definierten Empfindungsqualitäten behaupten können [3]). Diese vier von allen Autoren anerkannten Hauptqualitäten sind die Amara, die Dulcia, die Salsa und die Acida. Daneben werden nur zögernd noch der alkalische und der metallische Geschmack zugelassen.

Als bittere Stoffe seien angeführt [4]): Glykoside, Alkaloide, viele Amide, Magnesiumsalze, gallensaure Salze, Ureum.

Als süße Stoffe verzeichnen wir [5]): die Zuckerarten, Glyzerin, Glykol, Glykokoll, Saccharin, Dulzin, rechtsdrehende Asparaginsäure, Berylliumsalze, Bleisalze und Laugen [6]).

Als Salze nennen wir: die Chloride von Kalium, Natrium, Lithium, Kalzium, Ammonium, manche Nitrate und Sulphate [7]).

Als saure Stoffe endlich würden alle anorganischen und organischen Säuren anzuführen sein. Zitronensäure, Essigsäure, Weinsäure, Salzsäure fanden am meisten Verwendung.

Manche Stoffe besitzen neben ihrem Hauptgeschmack auch noch einen Beigeschmack, welcher oft, aber nicht immer, auf leichte Verunreinigungen zurückzuführen ist. Es gibt sogar eine gewisse Anzahl Stoffe, denen deutlich eine Doppelqualität zukommt, insofern, als sie an der Spitze, den Rändern oder an der Wurzel der Zunge verschieden schmecken. Man findet solche Stoffe mit Doppelqualität bei Marchand [8]) aufgezählt. Es kommen darunter sehr einfache Verbindungen vor, wie z. B. Kalium aceticum, Kalium nitricum und Kalium chloricum. Am genauesten untersucht wurde in dieser Hinsicht die kristallisierte d-Mannose. Nach der Meinung Sternbergs rührt der Doppelgeschmack im letzteren Falle und wahrscheinlich in vielen anderen von bei der Kristallisation mit eingeschlossenen

1) Haycraft, l. c.

2) Sternberg, Arch. f. Physiol. 1903, S. 113.

3) Oehrwall, Skand. Arch. f. Physiol. Bd. II, S. 1, 1891 u. Bd. XI, S. 256, 1901. Kiesow, Wundts philos. Studien Bd. IX, X u. XII. Haenig, ebend. Bd. XVII, Heft 4.

4) W. Sternberg, Geschmack und Geruch. Physiol. Untersuch. über den Geschmackssinn. Berlin 1904, S. 31 unterscheidet drei Klassen von bitter schmeckenden Substanzen. Die erste umfaßt die der anorganischen Verbindungen von bitterem Geschmack (amara salina), die zweite die aliphatischen Verbindungen von bitterem Geschmack (Zucker, Glykoside, Bitterstoffe), die dritte die bitter schmeckenden Verbindungen der aromatischen Reihe.

5) W. Sternberg, l. c, unterscheidet drei Klassen von süßschmeckenden Substanzen. Die erste ist die der anorganischen Verbindungen von süßem Geschmack, welche zum Teil Gifte, zum Teil Heilmittel sind. Nahrungsmittel sind die Körper der zweiten, Genußmittel die der dritten Klasse.

6) Ausführlicher W. Sternberg, Arch. f. Physiol. 1903, S. 113, 1905, Suppl. S. 201 und Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorgane Bd. 35. S. 81.

7) Ausführlicher W. Sternberg, Arch. f. Physiologie 1904, S. 483.

8) Marchand, Le goût, S. 143.

fremden Bestandteilen her[1]). In conereto wird sieh über diese Möglichkeit nicht immer ohne ausführliche ehemische Untersuchung entscheiden lassen. Für die physiologische Versuchstechnik hat es daher einen entschiedenen Vorteil, die Stoffe mit Doppelgeschmack oder Beigeschmack zu vermeiden und vorläufig nicht zu rein physiologischen Versuchen heranzuziehen. Ebenso verhält es sich mit den riechenden Schmeckstoffen, die namentlich in der organischen Chemie in großer Zahl vorkommen. Die sich beimischende Sinnesempfindung ganz anderer Ordnung erschwert das Experimentieren bedeutend.

Alle obengenannten Stoffe werden fast immer in Lösungen verwendet; in diesem Falle aber übt das Lösungsmittel, auch wenn es an sich nicht schmeckt, einen merklichen Einfluß auf die Intensität der hervorgerufenen Empfindung aus. Die wässerigen Lösungen haben unbedingt den intensivsten Geschmaek und zwar nicht allein, wenn Dissoziationen stattfinden, sondern auch wenn es sich um Substanzen handelt, deren Moleküle einer Zerlegung in Ionen nicht fähig sind. In solehen wässerigen Lösungen setzt die Hinzufügung kolloidaler Substanzen, wie Gummi arabicum oder Gelatin, die Geschmacksintensität bedeutend herab. Dies ist um so auffallender, weil die Diffusion als solche durch ihre Gegenwart gar nicht gestört wird. Die Annahme einer Bindung des Schmeckstoffs mit der als Sol oder als Gel vorhandenen kolloidalen Substanz ist zwar ohne darauf gerichtete Untersuehung nicht von der Hand zu weisen, aber ebensowenig erwiesen, wenn aueh eine solehe Hypothese für zum Teil dissoziierte Substanzen äußerst wahrscheinlich wäre. Aber nicht nur den mit kolloidalen Substanzen vermischten, wässerigen Lösungen und den mit Schmeckstoffen beteilten Gelen kommt ein abgeschwächter Gesehmack zu. Auch ölige und paraffinöse Lösungen schmeeken bedeutend weniger intensiv als wässerige. Dies trifft z. B. für Saccharin zu.

Gelegentlich werden die Schmeekstoffe auch ohne Hinzufügung irgend eines Lösungsmittels verwendet.

VIII. Die Saporimetrie.

Namentlich aus theoretischen Gründen, anfänglich mit der Valenzlehre, später mit der Dissoziationstheoric im Zusammenhang stehend, hat man sich in der Neuzeit vielfach bemüht, die Intensität, mit welcher bestimmte Schmeckstoffe einen Geschmack auslösen, messend zu verfolgen. Gewöhnlich gesehah dies naeh der Methode der Schwellenbestimmung in der Voraussetzung, daß die Schmeckintensität einer Substanz der Verdünnung, in welcher sie eine Geschmaeksempfindung hervorzurufen imstande ist, umgekehrt proportional sei. Bei allen diesen Versuchen wurden die betreffenden Substanzen in destilliertem Wasser gelöst und auf circa 24° C. erwärmt, in Anwendung gebracht. Nur die Quantität, welche jedesmal in den Mund genommen wurde, war in den konkreten Fällen verschieden. In den Tabellen der bei solchen Untersuchungen gefundenen Zahlenwerte, die wir hier zum Nutzen des Experimentators folgen lassen, ist die Menge in Klammern an-

1) W. Sternberg, Arch. int. de Pharmacodynamie et de Therapie vol. XIII, S. 9. 1904.

gegeben, in der die betreffenden Lösungen eben noch geschmeckt wurden. Zwischen den Versuchen wurde gewöhnlich eine gewisse Pause eingeschoben, während welcher die Mundhöhle sorgfältig mit Wasser ausgespült, verhältnismäßig selten etwas indifferent schmeckendes Brot genommen wurde.

Substanz		Konzentration in %	Beobachter
Bitterstoffe.			
Strychnin	(5 ccm)	0,00008	Richet u. Gley[1]
Strychninum sulphuricum	(0,5 ccm)	0,001	Lombroso u. Ottolenghi[2]
Nikotin	(5 ccm)	0,0003	Richet u. Gley
Chinin	(5 ccm)	0,0004	„
Chininum hydrochloricum	(10 ccm)	0,00004	Heymans[3]
Kolchizin	(5 ccm)	0,00045	Richet u. Gley
Cinchonin	(5 ccm)	0,0016	„
Veratrin	(5 ccm)	0,002	„
Pilokarpin	(5 ccm)	0,0025	„
Atropin	(5 ccm)	0,003	„
Akonitin	(5 ccm)	0,005	„
Kokain	(5 ccm)	0,015	„
Morphin	(5 ccm)	0,015	„
Ureum	(5 ccm)	0,75	„
Süßstoffe.			
Saccharin	(1,0 ccm)	0,0005	Venables[4]
Saccharin	(0,5 ccm)	0,001	Lombroso u. Ottolenghi
Zucker	(1,0 ccm)	0,03	Venables
Zucker	(10 ccm)	0,58	Heymans
Beryllium hydrochloricum	(2 ccm)	0,0125	Höber u. Kiesow[5]
Natriumhydroxyd	(2 ccm)	0,125	„
Salze.			
Chlornatrium	(1 ccm)	0,1	Venables
Chlornatrium	(2 ccm)	0,15	Höber u. Kiesow
Chlornatrium	(10 ccm)	0,25	Heymans
Chlornatrium	(4 ccm)	0,9	Kahlenberg[6]
Chlorkalium	(2 ccm)	0,5	Höber u. Kiesow
Jodnatrium	(2 ccm)	0,5	„
Natrium sulphuricum	(2 ccm)	0,45	„
Bromnatrium	(2 ccm)	0,4	„
Natrium nitricum	(4 ccm)	0,07	Kahlenberg
Natrium sulphuricum	(4 ccm)	2,3	„

1) Richet u. Gley, siehe Marchand, Le goût, S. 259.
2) Lombroso u. Ottolenghi, Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane Bd. 2, S. 337, 1891.
3) Heymans, ebend. Bd. 21, S. 330, 1899.
4) Venables, The Chem. News, S. 224, 1887.
5) Höber u. Kiesow, Zeitschr. f. phys. Chemie Bd. 27, S. 601, 1898.
6) Kahlenberg, Bull. University Wisconsin 1898, S. 25.

Substanz	Konzentration in %	Beobachter
Säuren.		
Ameisensäure . . . . . (2,5 ccm)	0,016	Corin[1])
Oxalsäure . . . . . (2,5 ccm)	0,02	„
Salzsäure . . . . . (1 ccm)	0,01	Venables
Salzsäure . . . . . (10 ccm)	0,0035	Heymans
Salzsäure . . . . . (4 ccm)	0,009	Kahlenberg
Salzsäure . . . . . (2,5 ccm)	0,025	Corin
Essigsäure . . . . . (2,5 ccm)	0,035	„
Essigsäure . . . . . (4 ccm)	0,06	Kahlenberg
Salpetersäure . . . . . (2,5 ccm)	0,04	Corin
Zitronensäure . . . . . (2,5 ccm)	0,04	„
Bernsteinsäure . . . . . (2,5 ccm)	0,055	„
Weinsteinsäure . . . . . (2,5 ccm)	0,06	„
Schwefelsäure . . . . . (12 ccm)	0,2	Valentin

In obenstehende Tabellen sind nur die Angaben aufgenommen, welche sich auf eine deutliche, qualitativ definierbare Empfindung beziehen. Die Grenzen, bei welchen die Schmeckstofflösungen sich vom destillierten Wasser unterscheiden ließen, lagen immer etwas niedriger.

IX. Das Schmecken im Experiment[2]).

Im gewöhnlichen Leben kann man auf zwei verschiedenen Wegen einen Geschmackseindruck bekommen. Erstens dadurch, daß man das Schmeckende in den Mund nimmt, und während des Kauens und Kostens prüft, zweitens dadurch, daß man das Schmeckende unmittelbar verschluckt. Im ersteren Falle kommen nur die Schmeckbecher der eigentlichen Mundhöhle in Betracht, im letzteren auch die Schmeckbecher des Schlundes.

Im Experiment kann das Schmecken auf nicht weniger als 5 ganz verschiedenen Wegen vorgenommen werden.

lokales Schmecken:

1. Indem man einzelne Stellen der hervorgestreckten Zunge mit dem ziemlich konzentrierten Schmeckstoff betupft.
2. Indem man bei geöffnetem Munde eines der wenigen schmeckenden Gase auf die Zunge bläst.
3. Indem man bei geöffnetem Munde die auf ihr Geschmacksvermögen zu prüfenden Stellen mit einem festen Schmeckstoff berührt.

integrales Schmecken:

4. Indem man eine Schmeckstofflösung in den Mund nimmt, prüft und nachher ausspuckt.
5. Indem man einen teilweise aus Schmeckstoff zusammengesetzten Trochiskus in den Mund nimmt und sich auflösen läßt oder besser, indem man dem Schmeckstoff Gelatin zusetzt.

Jede dieser Methoden hat gelegentlich Verwendung gefunden und soll hier kurz erörtert werden.

1) Corin, Arch. de biologie t. 8, S. 121, 1888.

2) Lit. siehe v. Vintschgau in Hermanns Hdb. d. Physiol. Bd. II, S. 197. Vaschide in Richets Dict. de Physiol. t. 7, p. 619.

a. Lokalisierende Methoden.

Erste Methode. Die erste Methode wird gewöhnlich in sehr verschiedener Weise ausgearbeitet, je nachdem man die Schmeckfähigkeit der gesonderten Papillen zu untersuchen beabsichtigt oder allgemeinere regionäre Beziehungen festzustellen wünscht. Bezweckt man ersteres, so ist eine gute Beleuchtung und Lupenvergrößerung mittels eines sogenannten Leseglases und punktförmige Reizung unbedingt notwendig. In dieser Weise ging z. B. Oehrwall vor, als er die disparate Verteilung der Geschmacksempfindungen über die fungiformen Papillen der Zungenoberfläche entdeckte[1]). (Fig. 13.) Die wirklich punktförmige Reizung geschieht dann bei unbeweglich gehaltener Zunge mit Hilfe von Pinseln (2 cm Länge und $^1/_2$ cm Dicke), deren Spitze so abgeschnitten wird, daß sie angefeuchtet und zugespitzt eine abgestutzte Fläche, etwas kleiner als die kleinsten pilzförmigen Papillenenden ergeben. Die früher oft befolgte Methode der Auftragung von Schmeckstofflösungen mittels Kapillarröhrchen findet zur punktförmigen Reizung keine Verwendung mehr[2]). Als Schmeckstofflösung wird am besten 2 % salz-saures Chinin, 40 % Zucker, 20 % Kochsalz und 2 % Weinsäure verwendet.

Fig. 13.
Die menschliche Zungenspitze in dreifacher Vergrößerung mit pilzförmigen Papillen. (Momentphothographie bei Magnesiumlicht, nach Oehrwall).

Will man aus dem Ergebnis solcher Prüfungen eine Schlußfolgerung ziehen in bezug auf die Verteilung der Geschmacksqualitäten über die einzelnen pilzförmigen Papillen, so hat man sich immer zu vergegenwärtigen, daß die Oehrwallsche Untersuchung eigentlich eine statistische ist, denn jede pilzförmige Papille enthält mehrere Schmeckbecher und außerordentlich viele Geschmackszellen. Die Wahrscheinlichkeit, daß gerade nur eine bestimmte Kategorie des Geschmacks für sich allein auf einer Papille vertreten ist, ist äußerst gering; etwas größer ist die Chance, daß eine Kategorie fehlt oder zurücksteht, und tatsächlich haben Oehrwall und nachher Kiesow[3]) solche Befunde verzeichnen können. Daß die Resultate von Fall zu Fall sehr weit auseinandergehen müssen, ist für die statistische Auffassung selbstverständlich, denn die Zahl der in Betracht kommenden und wahrscheinlich regellos verteilten Schmeckzellen der vier Geschmackskategorien ist groß genug, um eine ungeheure Anzahl zufälliger Kombinationen zu ermöglichen, und andererseits viel zu klein, um irgend eine Regelmäßigkeit erwarten zu lassen.

1) Oehrwall, Skand. Arch. f. Physiol. Bd. II, S. 43, 1891, benutzte zur Selbstbeobachtung auch den Konkavspiegel der Laryngologen. Goldscheider u. Schmidt, Zentralb. f. Physiol. Bd. IV, S. 10. Kiesow, Arch. ital. de Biologie T. 30, S. 398, 1898.

2) D. P. Haenig, Inaugural-Diss. zur Psychophysik des Geschmackssinnes, Leipzig 1901, betont die Überlegenheit feiner Haarpinsel, Tropfröhrchen gegenüber, sehr ausdrücklich.

3) Kiesow, Wundts Phil. Studien Bd. X, S. 333.

Ist eine Übersicht über die Verteilung der Geschmacksqualitäten über die pilzförmigen Papillen in einem konkreten Falle nur durch sehr umständliche Prüfungen mittels der Methode der punktförmigen Reizung zu erreichen, verhältnismäßig leicht läßt sich durch das beschriebene Vorgehen an der gehörig getrockneten Zunge die Tatsache feststellen, daß zwischen den Papillae fungiformes nicht geschmeckt wird und daß die isolierten Papillen sich den verschiedenen Geschmacksstoffen gegenüber verschieden verhalten können.

Ohne besondere Beleuchtung und ohne Lupe kommt man aus, wenn man nicht die gesonderten Papillen, sondern die einzelnen Regionen der Mundhöhle zu untersuchen beabsichtigt. Dann kann man auch die hinteren Teile der Zunge in den Kreis der Beobachtung ziehen, was bei genau punktförmiger Reizung bisher nicht möglich war. Auch vermindert sich dann die Chance, daß eine der Geschmacksqualitäten beträchtlich hervortritt oder zurücksteht, erheblich, weil die Zahl der Schmeckzellen in einer Region viel größer ist als auf einer Papille. Bei wahlloser Verteilung der Qualitäten über die Schmeckzellen der ganzen Zungenoberfläche muß also das Ergebnis der lokalisierten Prüfung gleichförmiger ausfallen als bei der oben beschriebenen punktförmigen Reizung. Dennoch zeigen sich Ungleichmäßigkeiten der Empfindlichkeit und der Empfindung auch bei regionärer Prüfung mit $2^1/_2$ mm breiten Haarpinseln. Sowohl Kiesow als Haenig haben oft vorkommende Arten der Verbreitung der vier Qualitäten über die Regionen der Zunge beschrieben, die als Muster der hier vorliegenden Verhältnisse angesehen werden können. Daß in den letzten Jahren manchmal auch abweichende Distributionen beschrieben worden sind, braucht uns nicht zu verwundern. Die Mannigfaltigkeit des Ergebnisses liegt ja wie bereits hervorgehoben, in der statistischen Natur der Erscheinung selbst begründet.

Die Resultate solcher Untersuchungen werden am besten auf einer kleinen Karte der Zunge (Oehrwall, Haenig) oder auf einem Täfelchen mit regionärer und qualitativer Einteilung (Kiesow, v. Frankl Hochwart) verzeichnet.

Zweite Methode. Auch die zweite Methode ist in zwei verschiedenen Modifikationen angewandt worden. Wenn man nur im allgemeinen das Schmecken von Gasen feststellen will oder auch groben regionären Verschiedenheiten, wie z. B. der Spitze und Basis, auf die Spur kommen will, genügen einfache Einblasungen durch ein 5 mm weites Glasrohr, das, wenn man abgemessene Reize anzuwenden beabsichtigt, in später zu beschreibender Weise mit einem Riechmesser in Verbindung gesetzt werden kann, der jetzt für den gasförmigen Schmeckstoff als Geschmacksmesser dient. Auf diese Weise läßt sich z. B. leicht feststellen, daß Chloroformdampf von der Zungenbasis süß empfunden wird, während die Zungenspitze diese Süßempfindung nicht besitzt[1]). Worauf diese Differenz zwischen dem Resultat der regionären Untersuchung bei flüssigen und bei gasförmigen Schmeckstoffen zurückzuführen ist, läßt sich vorläufig nicht angeben. Vielleicht hängt

1) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane Bd. 38, S. 193.

es von der Intensität des Reizes ab, ob die Zungenspitze für einen gasförmigen resp. flüssigen Schmeckstoff sich süßempfindlich zeigt und ist Chloroform einfach weniger süß als Zucker.[1])

Um eine genau punktförmige Lokalisierung des gasförmigen Schmeckstoffs zu erzielen, kann man den gasförmigen Schmeckstoff mittels eines fein zugespitzten Glasrohres auf die Zunge blasen. Diese Idee ist von Sternberg zu einer recht hübschen klinischen Methode ausgearbeitet worden. Die Einblasung geschieht dann mittels Doppelgebläse und einem oder zwei Glasgefäßen zur Aufnahme eines Süßstoffs und eines Bitterstoffs, die sich in zugespitzte Ansatzröhrchen fortsetzen. Sternberg empfiehlt als Süßstoff Chloroform, als Bitterstoff Äther (Fig. 14).

Dritte Methode. Die dritte Methode, die Berührung umschriebener Stellen der Zungenfläche mit fester schmeckender Substanz, kann entweder mit einem geeigneten Schmeckstoff, ohne weitere Hinzufügungen, oder mittels einer mit Schmeckstofflösung imbibierten Hydrogel stattfinden. Im

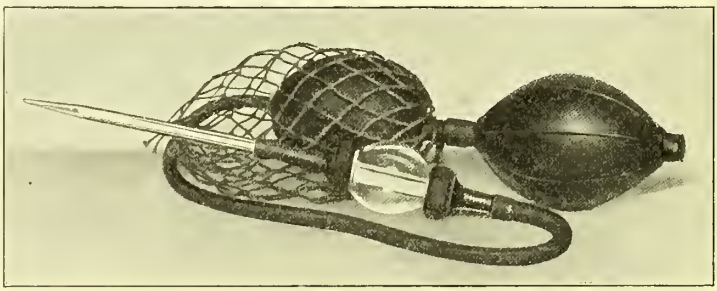


Fig. 14. Sternbergs zugespitztes Glasrohr und Doppelgebläse.

Aus einem in den Minologischen Instrumentskatalogen vorkommenden Chloroformbehälter wird ewas Chloroformdampf in kontinuierlicher Strömung auf die Zunge geblasen. Der ursprüngliche Apparat besitzt auch noch einen Hahn.

ersteren Falle können nur Schmeckstoffe Verwendung finden, die sich rein ohne Beimischung anderer Substanzen bearbeiten lassen und ohne zu viel Mühe in zugespitzte Form gebracht werden können. Als solche wollen wir Genzianextrakt, Kandiszucker, Steinsalz und Weinsteinsäure nennen. Die zugespitzten Stifte dieser Substanzen werden zum Gebrauch in einem Crayonhalter befestigt. Eventuelle Desinfektion des früher benutzten Stiftes findet mit Alkohol absol. statt. Nur die vorderen Partien der Zunge sind für diese Darreichungsform des Schmeckstoffs zugänglich. Vielseitiger ist die andere Art der Anwendung von festen Schmeckstoffen, wobei sie in einem Hydrogel inkorporiert werden (siehe unten).

1) W. Sternberg, Geschmack und Geruch, Berlin 1906, S. 42 scheint das Gegenteil zu meinen. Aus der Beschreibung seiner Versuche geht jedoch nicht genügend hervor, daß er die Einatmung, wodurch beim Exspirieren ein pharyngeales oder nasales Schmecken möglich wird, vermieden hat. So z. B. im Hauptversuch der 1. Alinea auf S. 43.

b. Integrierende Methoden.

Vierte Methode. Die vierte Methode ist fast in allen theoretischen Untersuchungen angewendet worden und empfiehlt sich ohne weiteres für alle Schmeckversuche, wobei es auf integrale Reizung der Geschmacksfläche ankommt. Man läßt ein wenig der Schmeckstofflösung in ein vollkommen reines kleines Medizingläschen abfließen, füllt bis auf eine vorher erwählte Menge mit Wasser an und bringt das Ganze auf eine Temperatur von 24° bis 37°. Man entleert die Flüssigkeit auf einmal in den Mund. Nach sorgfältiger Beobachtung entfernt man die Lösung wieder und spült mit reinem Wasser nach. Die Menge variierte in den in der Literatur mitgeteilten Versuchen zwischen 2,5 und 10 ccm. Während der Wahrnehmung wird meistens die Zunge hin und herbewegt, so daß für eine sorgfältige Verbreitung durch die ganze Mundhöhle und auch über die hinteren Teile der Zunge von selbst gesorgt ist.

Diese Art des Schmeckens schließt sich wohl am engsten dem natürlichen Kosten eines Getränkes an. Sie ist daher auch das älteste und beste Verfahren, das die psychologische Gustologie in Anwendung gebracht hat.[1])

Eine ausführliche Beschreibung der in der Technik verwendeten, wie er sie nennt, biologischen Geschmacksproben, findet sich bei Sternberg.[2])

Fünfte Methode. Entspricht die soeben genannte vierte Methode dem natürlichen Kosten einer Flüssigkeit, auch das Analogon des natürlichen Kostens einer festen Substanz fehlt in der Experimental-Technik nicht. Man läßt hierzu irgend eine feste Substanz, die an sich keinen Geschmack hat, sich mit dem Schmeckstoff imbibieren. Man hat dabei die Wahl zwischen porösen oder kolloidalen Substanzen. Unter ersteren steht als vollkommen geschmackloses festes Medium zur Aufnahme von Geschmackstofflösungen das Holundermark obenan. Man kann hiervon ziemlich große Stücke bekommen, die man in konzentrierte Schmeckstofflösungen einlegt, und unter der Luftpumpe ziemlich rasch und vollständig sich imbibieren läßt. Als Schmeckstofflösungen empfehlen sich: 1‰ Lösung von Chininum sulfuricum, 1‰ Lösung von Saccharin, 10% von Chlornatrium und 10% von Weinsäure.

Unter den kolloidalen Substanzen stehen Tragakant und Gelatin als geeignetes Material zur Verfügung. Mit ersterem werden wohl gewöhnlich Trochisci angefertigt, denen man vom Apotheker einen bestimmten Gehalt an Schmeckstoff erteilen läßt. Ähnliche Trochisci können übrigens auch durch einfaches Komprimieren aus irgend einem anderen willkürlichen geschmacklosen Pulver angefertigt werden. Die Gelatine findet zu Schmeckversuchen als eine 2% Hydrogel Verwendung. Zweckmäßig ist dabei der

1) Ch. S. Myers, Cambr. anthrop. Exp. to Torres Straits betupfte, obgleich er integral zu prüfen beabsichtigte, die getrocknete Zunge seiner Versuchspersonen mit Watten, die mit verdünnten Lösungen von Chinin, Zucker, Salz oder Essigsäure getränkt waren.

2) W. Sternberg, Kochkunst und ärztliche Kunst, Stuttgart 1907, p. 22.

Zusatz von 1‰ Formaldehyd, weil sonst leicht eine störende Pilzbildung eintritt. Auch hier kommen die soeben genannten Schmeckstoffe in Betracht, wobei man jedoch die Weinsäure durch Salzsäure zu ersetzen hat.

X. Die Geschmacksmessung (die Gustometrie).

Viele Geschmacksempfindungen gehen mit gleichzeitigen Geruchs-, Tast- und Temperaturempfindungen einher. Die ersteren lassen sich leicht ausscheiden durch Zuhalten der Nase,[1]) die letzteren durch genaue Regulierung der Temperatur der zu prüfenden Flüssigkeit. Die Tastempfindungen lassen sich am schwersten beseitigen. Die stark auseinander gehende Empfindlichkeit des Tastsinnes auf der Zunge, die von Kiesow[2]) genau untersucht wurde, läßt sich leider nicht zur näheren Deutung einer vom Beobachter unsicher angegebenen Empfindung heranziehen, da der am meisten sich empfehlenden Stelle der geschmackentbehrenden Mitte der Zunge nur eine sehr geringe Tastempfindlichkeit zukommt. Man würde also genötigt sein, auf dem Palatum durum oder auf der Wangenschleimhaut zu prüfen, was beides recht unbequem ist. Toulouse und Vaschide nahmen ihre Zuflucht zu folgendem Kunstgriff: ein Tröpfchen Wasser auf irgend einen Punkt, der Mundschleimhaut deponiert, wird überhaupt nicht empfunden, wenn die Temperatur des Wassers 24° ist. Wenn man daher statt mit Wasser mit einer Schmeckstofflösung prüft, so darf man, falls eine Empfindung zustande kommt, diese sicher als Geschmacksempfindung deuten.

Die messende Verfolgung der reinen Geschmacksempfindungen, welche nach Ausscheidung der Nebenempfindungen übrig bleiben, geschieht regionär oder integral.

a. Regionäre Geschmacksmessung.

Unter regionärer Geschmacksmessung verstehen wir die lokalisierte Untersuchung des Geschmackssinnes eines normalen oder pathologischen Individuums in einer bestimmten Zone der Zunge oder innerhalb des Verbreitungsgebietes eines bestimmten Nerven. Die zonale Untersuchung ist namentlich von Haenig geübt worden und man findet in seiner Inauguraldissertation recht einfache und deutliche kleine Zungenskizzen, die man gelegentlich zum Vergleich heranziehen kann. Die Regionen außerhalb der Zunge Uvula, Tonsille, Gaumenbogen Epiglottis und Larynxinneres sind in neuerer Zeit von Kiesow und Hahn geprüft worden. Während für die Untersuchung der Zungenregionen keine besonderen Vorbereitungen erforderlich sind und man nur die schmeckende Flüssigkeit ganz einfach mit einem Pinsel aufzutragen hat, erfordern die hinteren Partien der Mundhöhle ganz besondere Fürsorge. Abgesehen von der Subjektivität der Angaben der Versuchspersonen, welche das Resultat aller Geschmacksprüfungen trüben kann, droht hier noch besonders die Gefahr des Herabträufelns und der

1) Man findet die „Saveurs-odeurs“ ausführlich aufgezählt bei W. Sternberg, Geschmack und Geruch. Berlin 1906. S. 12—36.

2) Zeitschr. f. Physiol. Bd. 26. S. 390. 1901.

Diffusion der mit einem Pinsel aufgetragenen Flüssigkeit. Um letztere wenigstens sehen und kontrollieren zu können, kann man der Schmeckstofflösung etwas Methylenblau zusetzen, noch besser ist es, zu besonderen Methoden zu greifen, die besonders für schwer zugängliche Teile der Geschmacksfläche ersonnen wurden. So hat Kiesow für die Untersuchung der (nicht geschmacksempfindlichen) Uvula einen kleinen Uvulabecher angegeben, welcher an einem langen Stiele befestigt, über einen Zungenhalter eingeführt wird. In dem kleinen Becher befindet sich etwas Geschmackstofflösung, in welche die Uvula eintauchen kann, ohne daß irgend eine andere Stelle berührt wird. (Fig. 3.)

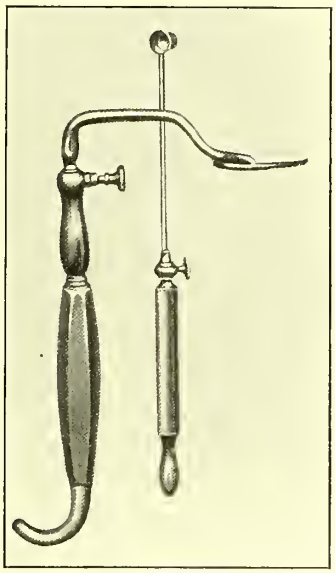


Fig. 15.
Kiesows Uvulabecher, nebst Türkschem Zungenhalter.

Für die Untersuchung des Larynx und des Pharynx eignet sich vorzüglich die von Quix in meinem Laboratorium ausgearbeitete Methode des in einem Glasrohr aufgenommenen mit konzentrierter Riechstofflösung beschickten Hydrogel (2 % Gelatin, trocken abgewogen). Für den Larynx gibt man dem Glasrohr die Krümmung eines gewöhnlichen Larynxinsufflators. Das außerhalb der Mundhöhle bleibende, seitwärts abgebogene Ende wird mit einem kleinen Kautschukballon verbunden, mittels welches man im geeigneten Moment einen halbweichen Tropfen der Gelatingallerte hervorpreßt. Man berührt mit diesem Tropfen die zu untersuchende Stelle und stellt fest, ob die

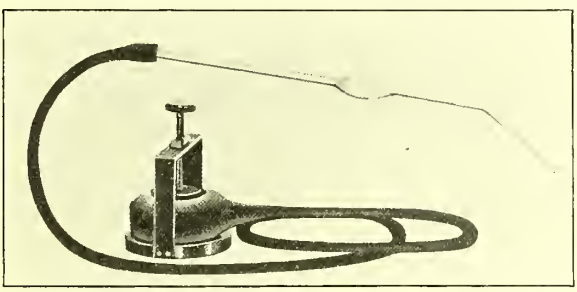


Fig. 16. Quixsche Pipette für mit Schmeckstoff beschicktem, tropfförmig herausgepreßtem Gelatine.

Geschmacksempfindung zustande kommt, bevor sich der Tropfen gänzlich verflüssigt hat. Wenn die Konzentration des Schmeckstoffs nicht zu gering gewählt ist, ist dies an Stellen, die überhaupt Geschmacksempfindung besitzen, gewöhnlich der Fall (Fig. 15).

Sollen die oberen Partien des Pharynx untersucht werden, so bekommt das Glasrohr die Form eines Itardschen Katheters. Letzterer kann auch wie gewöhnlich von Metall genommen und durch die Nase eingeführt werden, sogar die Gegend der Tubarkrater kann in dieser Weise untersucht werden und, wie mein Mitarbeiter feststellte, bei manchen Personen für Bitter und Süß sich empfindlich erweisen. Quix verwendete als Bitterstoff Chininum muriaticum 0,1 bis 0,4% in wässeriger Lösung, das je nach der Jahreszeit mit einer 1 bis 2 % Gelatingallerte zusammengeschmolzen wurde. Als Süßstoff kam 30 bis 60 % Zuckerlösung zur Verwendung, als salzige Substanz 10 bis 20 % Chlornatrium und als saure Lösung 2 % Salzsäure. Der größeren Haltbarkeit wegen werden vor dem Anfüllen der Röhre der Gelatingallerte einige Tropfen Formaldehydlösung zugesetzt. Die schwächste der soeben genannten Konzentrationen wurde von den meisten untersuchten Personen an überhaupt empfindlichen Stellen noch gerade empfunden. Will man eine ganz deutliche, unzweifelhafte Empfindung erzielen, so empfiehlt es sich also zu den höheren Konzentrationen zu greifen.

Süss, schwach, mittel, stark.	Bitter, schwach, mittel, stark.
Sauer, schwach, mittel, stark.	Salzig, schwach, mittel, stark.

Fig. 17. Qualitäten-Täfelchen nach v. Frankl-Hochwart.

Die regionäre, quantitative Untersuchung der von bestimmten Nerven innervierten Gebiete wird hauptsächlich aus klinischem Interesse geübt. Dabei wird der Schmeckstoff in einer mehr oder weniger konzentrierten Lösung mittels Haar- oder Wattenpinseln (v. Frankl-Hochwart)[1]) aufgetragen. Die Versuchsperson gibt dabei ihre Beobachtungen an, indem sie mit dem Finger auf ein bereit gelegtes Täfelchen die Qualität und die ungefähre Intensität der Empfindung anzeigt (Fig. 17).

Besonders muß man, wie F. Krause[2]) betont, darauf Rücksicht nehmen, daß die Untersuchten rasch ermüden; daher sind lange Ruhepausen nötig; ferner müssen die Untersuchungen zu verschiedenen Zeiten wiederholt werden. Man lernt so am besten die großen Schwierigkeiten, die sich der Gewinnung eines brauchbaren Ergebnisses entgegenstellen, kennen und überwinden. Die hinteren Abschnitte der Zunge und des Gaumens werden nach gehöriger Abtrocknung unmittelbar mit dem angefeuchteten Pinsel berührt.

Die regionäre messende Prüfung des Geschmackssinns sollte eigentlich in der Klinik in weit größerem Maße erfolgen, als dies bis jetzt der Fall ist, denn in einer ungemein großen Anzahl von Fällen verdankte die Diagnostik und auch die theoretische Wissenschaft ihr bereits wichtige Aufklärung. Man findet das klinische Beobachtungsmaterial der Neuzeit von Frankl-Hochwart in Nothnagels Handbuch der speziellen Pathologie und Therapie Bd. XI, 2. Teil und bei Marchand, Biblioth. internat. de Psychologie experimentale Nr. 10.

1) Die Watte kann um eine Nadel oder ein Streichhölzchen gerollt werden.
2) F. Krause, Die Neuralgie des Trigeminus, Leipzig 1896, S. 82.

b. Integrale Geschmacksmessung.

Die integrale Geschmacksmessung fand bis jetzt fast immer mit wässerigen Lösungen statt, die in verschiedenen Konzentrationen bereit gehalten, aus einem kleinen Bechergläschen oder aus einem Tropfenzähler in den Mund gebracht wurden. Wenn auch die Geschmacksempfindlichkeit bei den mittleren Temperaturen nicht stark fluktuiert, so bleibt es doch erwünscht, die zu prüfenden Lösungen bis auf 24° bis 37° zu erwärmen, was am besten im einem Thermostaten geschieht. Die Hauptschwierigkeit der Untersuchung ist die ungeheuer lange Zeit, welche sie erfordert, wenn man die verschiedenen Konzentrationen durchprüfen will, die man der Reihe nach mit den sehr verdünnten anfangend und dann allmählich aufsteigend, während des Versuchs anfertigen muß. Zwar kann dies ziemlich rasch geschehen, wenn man den Schmeckstoff aus einer Bürette in ein Medizinglas fließen läßt und die abgemessene Menge bis zu einem bestimmten, im voraus festgestellten, Volum mit reinem Wasser anfüllt. Aber in diesem Falle muß man, um bequem arbeiten zu können, die Flüssigkeitsmenge, welche man jedesmal in den Mund nimmt, nicht allzu gering wählen, z. B. 10 ccm. Und wenn man so vorgeht, so stellt sich die, der Schwellenempfindung entsprechende Menge des Schmeckstoffs als ziemlich groß heraus, jedenfalls größer als wenn man eine geringere Menge, z. B. 2 ccm gewählt hätte. In dieser Hinsicht bedeutet eine von Toulouse und Vaschide angegebene Methode einen wichtigen Fortschritt. Ähnlich ihrer olfaktometrischen Methode haben sich diese Untersucher eine ausgedehnte Reihe kleiner Fläschchen mit dezimalen Lösungen zurechtgestellt. So verfehlt diese Methode bei der Riechmessung ist, weil das Riechen an Lösungen aufsteigender Konzentration nicht mit dem Riechen von aufsteigend konzentrierten Gasen identisch ist, so rationell ist die Toulouse-Vaschidesche Methodik für die Geschmacksprüfung. Der Stopfen aller dieser Fläschchen hat einen Tropfenzähler, aus welchem man die Tropfen zur Größe von $^1/_{50}$ ccm auf die Zunge der Versuchsperson fallen lassen kann. Zehn hintereinander vorgenommene Versuche ergeben einen Mittelwert, der als Geschmacksschwelle angesehen wird. Dabei wird die Feststellung der Geschmacksqualität verlangt, was einen deutlich höheren Wert erfordert, als die einfache Angabe, daß der Betreffende etwas Schmeckhaftes spürt. Toulouse und Vaschide bestimmen also Erkennungsschwellen und keine Reizschwellen. Nach jedem Versuche spült sich die Versuchsperson den Mund mit 5 ccm destilliertem Wasser von 38° aus und ruht einen Augenblick. Die Zwischenpause soll für die bitteren Lösungen 5 Minuten, für die drei übrigen 3 Minuten dauern. Die Methode ist ursprünglich als integrale Methode angegeben (man sehe z. B. die Regeln zur Ausführung bei N. Vaschide in Castexs Bulletin de Laryngologie vom 30. Juni 1903, S. 6), später auch wohl als regionäre Methode benutzt worden, wozu sie jedoch weniger geeignet ist. Nur wenn man sie mit der Oehrwall-Kiesowschen Methode kombiniert, wie vor kurzem M. Haemelinck[1]) tat, kann sie Vorzügliches leisten. Man tropft dann die Lösung aus dem Tropffläschchen

1) l'Année psych. t. XI, S. 121, 1905.

statt auf die Zunge auf einen Pinsel, mit welchem man die Zunge betupft.

Als Bitterstoff verwenden Toulouse und Vaschide Chinin-di-bromhydrat, später Chinin-sulfo-chlorhydrat, letzteres in Lösungen 1:100000, 1:10000, 1:1000, 1:100, 1:10. Als Süßstoff kommt Zucker zur Verwendung, und zwar in Lösungen von 1:10000, 1:1000, 1:100, 1:10. Für den salzigen Geschmack ist eine weit ausgedehntere Reihe angegeben, nicht weniger als 31 Fläschchen, anfangend mit einer Lösung 1:1000000 und bis zur völligen Sättigung führend. Alle enthalten Chlornatrium. Die sauren Lösungen sind mit Zitronensäure hergestellt und zwar in Konzentrationen von 1:100000, 1:1000, 1:100, 1:10. Zu Vexierversuchen steht destilliertes Wasser bereit.

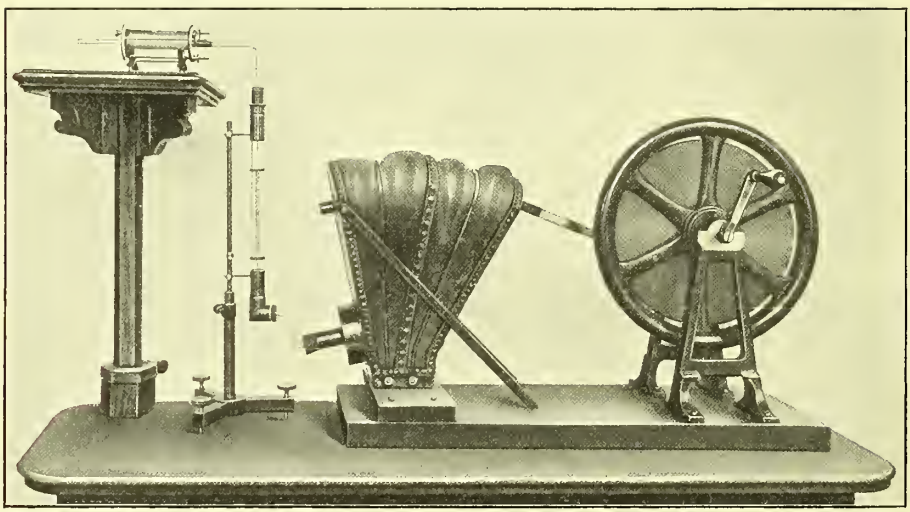


Fig. 18. Zwaardemakerscher Apparat zur Insufflation gasförmiger Schmeckstoffe in abgestuften Konzentrationen.

Die einzige Schwierigkeit, welche diese hübsche Methode darbietet, ist der Umstand, daß die Lösungen, auch wenn sie unter Lichtabschluß aufbewahrt werden, alle 14 Tage erneuert werden müssen, was bei 49 Fläschchen immerhin eine etwas zeitraubende Beschäftigung ist. Von einem immer Bereithalten der „boite gustométrique" kann also nicht die Rede sein, was bei der früher beschriebenen titrimetrischen Anfertigung im Augenblick der Untersuchung sehr wohl möglich ist, weil konzentrierte Lösungen sich leicht aufbewahren lassen.

Auch die Insufflation gasförmiger Schmeckstoffe ist in jüngster Zeit zur quantitativen Geschmacksprüfung angewendet worden.

Gelegentlich habe ich selber früher solche Versuche gemacht (Fig. 18).

Ein großer Apparat für künstliche Atmung (Blasebalg), der sonst für Vivisektionen dient, wird durch einen Elektromotor in Gang gesetzt; jede Sekunde ungefähr treibt er mit ziemlicher Kraft ein gewisses Luftquantum

in eine ganz aus Glas und Metall gebaute Strombahn. Diese Strombahn enthält:

1. einen Anemometer mit momentaner Angabe,
2. einen mit Chloroform-Paraffingemisch resp. Äther-Wassergemisch gefüllten olfaktometrischen Magazinzylinder,
3. ein innerhalb des Magazinzylinders verschiebbares Innenrohr.

Zu sub 1 benutze ich den von mir als Aërodromometer früher beschriebenen[1]) kleinen Apparat. Dieser enthält eine zwischen zwei dünnen Metallfedern aufgehängte Windfahne. Bei jedem Schlag des Insufflators findet ein Ausschlag der Windfahne über 10 zu je 12 mm statt. Wenn man erwägt, daß an einem solchen Apparat die tiefe Atmung des Menschen einen Ausschlag von 4 mm hervorruft, leuchtet es ein, daß in dieser Weise wirklich kräftige und regelmäßige, aber keineswegs übertrieben starke Luftstöße zustande gebracht werden.

Für sub 2 kann ein 80 % Chloroform enthaltender Magazinzylinder Verwendung finden.

Sub 3 endlich ist eine einfache horizontale Glasröhre mit Zentimeterteilung, die in den Mund geführt wird. Sie wird nach dem Olfaktometerprinzip mehr oder weniger aus dem Magazinzylinder hervorgezogen.

Der Beobachter stellt nun erst die horizontale Glasröhre an eine bestimmte Stelle z. B. $^1/_2$ cm, 1 cm, 2 cm usw., bläst die darin stagnierende Luft fort und gibt genau acht. Ein Helfer setzt im gleichen Augenblick den Insufflator in Gang.

In viel größerem Maßstabe hat W. Sternberg[2]) Insufflationen von Chloroform resp. Ätherdampf verwendet.

Nach Art der Tonröhren des Olfaktometers[3]) werden durchbohrte poröse Tonzylinder, die von der Delfter Fayence-Fabrik (vormals Joost, Thooft & Labouchère) geliefert sind, mit den flüchtigen Schmeckstoffen imprägniert, mit einem Mantel dicht umgeben, und alsdann der flüchtige Schmeckstoff aus dem Zylinder durch ein Saug-Ventil in der einen Richtung angezogen und durch ein zweites Druck-Ventil in eben derselben Richtung herausgetrieben. Je nachdem nun die Saugwirkung an dem einen kleineren Abschnitt des Zylinders oder an einem größeren Abschnitt ausgeübt wird, ist der Reiz und damit die Reizwirkung eine entsprechend größere.

Der Apparat selber stellt sich folgendermaßen dar:

In einem porösen Holzzylinder, der einen etwa 5 mm starken Boden hat, wird mittels Zahntriebes ein luftdicht anschließender hohler Kolben bewegt, der aus Kork oder sonst geeignetem Material besteht, welches von den flüchtigen Schmeckstoffen nicht angegriffen wird.

Aus dem Hohlraum des porösen Zylinders wird die Luft durch die hohle Kolbenstange in eine kleine schlauchförmige Gummihülse gesaugt, deren Enden mit zwei Ventilen versehen sind, einem Saug- und einem Druckventil.

---

1) Archiv f. Physiologie, 1902, Suppl., S. 47, Kongreß Brüssel, Septbr. 1904.
2) W. Sternberg, Geschmack und Geruch, Berlin 1906, S. 147.
3) Siehe das Kapitel über Geruch.

Die Einstellung des Kolbens im Zylinder wird durch Drehen eines Handrades bewirkt, dessen Zähne in eine Zahnleiste der Kolbenstange eingreifen. An einer Skala kann man die Tiefe des Kolbens im porösen Hohlzylinder ablesen.

Ein mittels Federdrucks die Gummihülse zusammenpressender Hebel bewirkt den Austritt der aus dem Zylinder angesaugten Luft nach der Mündung des Apparats.

Der poröse Zylinder ist mit einem Metallmantel umgeben, dessen Deckel mittels Bajonettvorrichtung geschlossen wird. An dem Mantel befinden sich zwei verschließbare Stutzen zum Eingießen resp. Entleeren der Flüssigkeit, mittels welcher der Zylinder getränkt werden soll.

Auf einer Schraubenzwinge, die an beliebigem Tisch angeschraubt werden kann, wird ein Tischchen der Höhe nach einstellbar befestigt.

Auf diesem Tischchen ist das Ende der Kolbenstange des Imprägnierungsapparates derart befestigt, daß beim Drehen des Handrädchens der Hohlzylinder nebst Schutzmantel auf dem Tischchen in einem Schlitz mittels Stift geführt gleitet.

Je tiefer der Kolben aus dem porösen Zylinder herausgeschraubt wird, desto mehr ist die Luft mit dem flüchtigen Schmeckstoff imprägniert, desto intensiver ist also der Geschmack.

Die mittels dieser Methode ausgeführten Prüfungen führen nach dem genannten Autor zu ganz überraschenden Ergebnissen. „Die Grenzen der sinnlichen Wahrnehmbarkeit seitens des Geschmackssinnes überhaupt, außerdem aber auch die Begrenzungen der Intensität des Geschmacks mancher flüchtigen Schmeckstoffe erfahren durch systematische Untersuchungen mittels dieser quantitativen gasometrischen Gustometrie eine bisher nicht geahnte Änderung".

XI. Der elektrische Geschmack.

Der elektrische Geschmack kann, wie wir wohl nicht besonders zu beschreiben haben, mittels d'Arsonvalscher unpolarisierbarer Elektroden geprüft werden. Sehr hübsch und für dieses Terrain besonders ausgedacht ist die Methode Ch. Henrys[1]). Ein ganz kleines Scheibchen aus Silber, das zuvor sorgfältig gereinigt wird, wird auf die Zunge gestellt. Das Silber hat Kontakt mit einem Stückchen mit Wasser getränkten Filtrierpapiers und dieses wieder mit einem Stückchen Magnesium. Es entsteht auf diese Weise eine Kette, die man nur zu schließen braucht, um einen leichten Geschmackseindruck zu veranlassen. Henry verwendete dies mit Erfolg zur Feststellung der Reaktionszeit des Geschmacks. Dabei kompliziert sich jedoch die Fragestellung bedeutend durch die Unsicherheit, ob es die Geschmackszellen selbst oder die Nervenendigungen sind, welche gereizt werden. Bekennt man sich zu der von Zeynekschen Ansicht, daß es wirklich die Elektrolyse der Mundflüssigkeit ist, so ist die Sache einfach genug und

1) Soc. d. biol., 27. Okt. 1894.

eignet sich die Methode, sowohl zur Feststellung der Reaktionszeit, als auch zur genauen quantitativen Ermittelung der eine saure Empfindung hervorrufenden Ionenmenge.

XII. Die Reaktionszeit.

Die Bestimmung der Reaktionszeit des Geschmacks begegnet der Schwierigkeit, aus den Bruttowerten des Beobachtungsmaterials durch Abzug der Diffusionszeit die reduzierten Werte herzuleiten. Am ehesten wird dies noch gelingen, wenn man sich der Methode Camerers bedient, der kurze Röhrchen auf die hervorgesteckte Zunge stellte und nachher aus einer Pipette mit der Schmeckstofflösung anfüllte. Dann wäre es wenigstens noch einigermaßen möglich, die Diffusionszeit nachträglich aus der Konzentration der benutzten Lösung und aus jener der überhaupt schmeckbaren Lösung (Schwellenlösung) bei lang andauernder integraler Bestimmung zu berechnen und in Abzug zu bringen. Beobachtungen liegen, soviel ich weiß, außer den älteren Camererschen nicht vor.

XIII. Intoxikationen des Geschmacks.

Der Geschmack läßt sich in sehr charakteristischer Weise durch mehrere toxische Stoffe beeinflussen, um eine artifizielle Ungleichheit für verschiedene Qualitäten hervorzurufen. In erster Reihe dient zu diesem Zweck das Kokain, welches den Geschmack viel rascher als die Tast- und Schmerzempfindungen aufhebt. Die Qualität, deren Wahrnehmung am frühesten und ausgiebigsten durch Kokainisierung beeinträchtigt wird, ist das Bittere. Eine einmalige Pinselung der Zunge mit 2 % Kokain genügt bereits, um den Geschmack von Chininum sulphuricum gänzlich aufzuheben. Die übrigen Qualitäten sind dann, wenn auch abgeschwächt, noch erhalten; erst durch wiederholte Pinselung lassen sich alle Geschmacksempfindungen gänzlich aufheben [1]). Ein anderer Stoff, dem eine noch deutlichere qualitative Auswahl seiner toxischen Wirkung zukommt, ist die Gymnemasäure. Die Blätter von Gymnema silvestre, einer in ganz Indien wachsenden Asklepiadee, besitzen die Eigentümlichkeit, in den Mund genommen und ein wenig gekaut, den Geschmack für süß völlig zu tilgen. D. Hooper führte die Eigenschaft auf den in den Blättern enthaltenen Bitterstoff zurück, die Gymnemasäure, von welcher gewöhnlich eine konzentrierte alkoholische Lösung benutzt wird. L. E. Shore unterwarf die Substanz einer ausgiebigen Untersuchung; meistens wurde eine 2 % wässerige Lösung des Natriumsalzes verwendet. Es zeigte sich, daß Zucker wie Sand und Chinin wie Kreide schmeckt, wenn die Zunge zuvor mit Gymnemasäure bepinselt worden ist. Die Wirkung ist von ungleich längerer Dauer als jene des Kokains und kann viele Stunden, ja sogar einen ganzen Tag anhalten. Die taktische Empfindung und die

1) F. Kiesow, Wundts Philos. Studien Bd. 9, S. 510, 1899.

Schmerzempfindlichkeit läßt der Körper jedoch ganz unbeeinträchtigt, und auch der salzige und der saure Geschmack bleiben so gut wie ganz erhalten. Sternberg[1]) benutzt gelegentlich auch Gymnemasäuretabletten (Merck).

In neuerer Zeit ist noch ein dritter Stoff, das Eukain B, untersucht worden[2]). Nach fünfmaliger Pinselung zeigte sich die Bitterempfindung, welche zuvor deutlich vorhanden gewesen war, völlig verschwunden. Die drei anderen Qualitäten waren ebenfalls abgeschwächt, aber nicht immer gänzlich aufgehoben. Die Wirkung des Eukain ist also jener des Kokain sehr ähnlich. Es empfiehlt sich zu Geschmacksversuchen neben der Gymnemasäure, um so mehr, weil es eine nur ganz geringe Giftigkeit besitzt.

1) Sternberg, Geschmack und Geruch, Berlin 1905, S. 43.
2) Fontana, Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane, Bd. 28, S. 253, 1902.

2. Abteilung:

Sinnesphysiologie II

I.

Methoden zur Erforschung des Licht- und Farbensinns

von

Wilibald Nagel in Rostock.

(Mit 53 Figuren und 1 Tafel.)

A. Methoden zur Erforschung des Lichtsinns.

I. Die Lichtquellen für physiologisch-optische Untersuchungen.

1. Die Verwendbarkeit der einzelnen Lichtquellen.

Die natürlichen Lichtquellen kommen in Form des direkten Sonnenlichtes und des vom blauen oder bewölkten Himmel diffus ausgestrahlten Tageslichtes in Betracht.

Für viele Versuche ist das natürliche Tageslicht durch nichts zu ersetzen. Es übertrifft die meisten künstlichen Lichtquellen durch seinen Reichtum an kurzwelligen Strahlen, insbesondere Ultraviolett. Wichtig sind ferner die bei spektraler Zerlegung auftretenden Fraunhoferschen Linien, die zur genaueren Bestimmung des spektralen Ortes und zur Eichung von Spektralapparaten wertvoll sind.

Ein Vorteil, der sich nur in der wärmeren Jahreszeit und in günstigen Klimaten geltend macht, ist die über längere Zeit, unter Umständen mehrere Stunden, anhaltende Konstanz des Lichtes in quantitativer wie qualitativer Hinsicht bei sehr hoher Intensität. Um die Richtung namentlich der direkten Sonnenlicht-Strahlen längere Zeit konstant zu halten, ist ein Heliostat erforderlich.

Bei diffusem Wolkenlicht muß man mit erheblichen, für das Auge nicht immer leicht erkennbaren Änderungen der Qualität und Intensität innerhalb kurzer Zeit rechnen.

Von den künstlichen Lichtquellen bleiben die für Photometrie benutzten Normalkerzen sowie die Hefner-Lampe hier außer Betracht, da ihre Verwendung für physiologische Versuche meistens viel zu unbequem wäre.

Das elektrische Bogenlicht entfaltet seine Vorzüge da am meisten, wo es auf intensive Bestrahlung größerer Flächen ankommt, auf ein an kurzwelligen Strahlen verhältnismäßig reiches Licht, nicht aber auf Konstanz der Intensität und der Lichtzusammensetzung. Für Messungszwecke ist es selbst da unbrauchbar, wo eine nur wenige Sekunden andauernde Konstanz

verlangt wird; die Ungleichmäßigkeit der Kohlen bedingt auch bei völliger Konstanz des Stromes und bester Reguliervorrichtung häufige plötzliche Schwankungen der Lichtintensität um mehr als 100%.

Im Violett zeigt das Bogenlichtspektrum einen breiten Absorptionsstreifen. Wünscht man eine Verstärkung der ultravioletten Strahlen, so tränkt man die Kohlen in einer Lösung von Zink- oder Kadmiumsalzen, wonach sie gut zu trocknen sind.

Der gleiche Zweck wird in besonders wirksamer Weise durch die Bogenlampen mit Eisenelektroden nach Bang erzielt; wenn die Elektroden hohl gemacht und durch Wasserspülung gekühlt werden, wird die Intensität der sichtbaren, von den Elektroden ausgehenden Strahlen bedeutend vermindert, während die ultravioletten Strahlen ungeschwächt bleiben. Finsen und seine Mitarbeiter haben verschiedene Vorrichtungen angegeben, die die Bestrahlung circumskripter Stellen mit derartigem Licht unter möglichster Ausnutzung der Lampe gestatten. Die Linsen sind aus Bergkristall, eine Wasserkammer hält die Wärmestrahlung ab [15]).

Sollen Metalle oder Salze im Flammenbogen verbrennen, so bohrt man in die positive Kohle einen zentralen Kanal und füllt die Substanz dochtartig hinein. Man blendet die glühenden Kohlen ab, so daß nur der Lichtbogen als Lichtquelle dient.

Wenn Bogenlampen ungleichmäßig brennen, lange zischen, Zapfen an den negativen Kohlen bilden und von selbst ausgehen, so liegt das meistens an der nicht richtigen Stromstärke, wogegen viele Lampen sehr empfindlich sind. Der vorgeschaltete Widerstand muß dann geändert werden.

Um ein kleines, in sich gleichmäßig helles Feld von großer Lichtintensität zu erhalten, genügt meistens die reelle Abbildung des positiven Kohlenkraters nicht, weil seine Fläche zu ungleichmäßig leuchtet. Wesentlich Besseres erreicht man bei Projektionsbogenlampen, wenn man etwa 2 cm von den Kohlen entfernt zwischen diesen und den Beleuchtungslinsen ein Blättchen mattierten Glimmer oder Quarz einschiebt, das dann für das Projektionssystem als flächenförmige Lichtquelle dient. Auch kann man hinter den Kohlen eine weiße Gipsfläche anbringen, der die Konkavität des Kraters der schiefgestellten Kohle zugewandt ist. Eine reelle Abbildung eines etwa 1—2 cm großen Stückes dieser Fläche kann für viele Fälle als hinreichend gleichmäßig leuchtend betrachtet werden und gibt große Intensität.

Die Quecksilberbogenlampe nach Arons in ihren zahlreichen Modifikationen bietet für manche Zwecke große Vorteile. Die Lichtquelle besteht aus glühendem Quecksilberdampf und gibt daher, spektral zerlegt, ein vollkommen diskontinuierliches Linienspektrum mit scharfbegrenzten Linien. Das längstwellige darin enthaltene Licht ist gelb, das Lichtgemisch also rotfrei. Rein rote Pigmente sehen in der Quecksilberbeleuchtung schwarz aus wie im Natriumlicht. Andererseits ist das Blau und Violett sehr stark vertreten, wodurch das Licht seine bedeutende photographische Wirksamkeit erhält. Das Linienspektrum ist bequem zur Eichung von Spektralapparaten zu verwenden, doch liegen die Linien des Heliumspektrums noch bequemer.

Die deutlich hervortretenden Quecksilberlinien sind folgende:

$$\lambda = 579{,}0;\ 576{,}9;\ 546{,}1;\ 435{,}8;\ 407{,}8;\ 404{,}7.$$

Von den zahlreichen existierenden Konstruktionen kommen außer der ursprünglichen Aronsschen je nach dem Zweck zwei Typen hauptsächlich für die physiologische Optik in Betracht:

1. die großen, $^1/_2$ bis $^2/_3$ m langen Quecksilberdampfröhren, die entweder in senkrechter Stellung brennen (Röhren der Allg. Elektr. Gesellsch.) oder in schräger (Westinghouse Elektr. Gesellsch.) und zur Erleuchtung großer Flächen dienen können.

2. die kurzen Röhren mit kleiner, aber intensiver Leuchtfläche, besonders zur Eichung von Spektralvorrichtungen, wie sie nach Angabe von Lummer und Straubel von E. Gundelach, Gehlberg in Thüringen, hergestellt werden. Mit der Wasser-Kühlvorrichtung können diese Lampen stundenlang brennen.

Die Intensität aller dieser Lampen ist äußerst inkonstant, wenn man die Lampe als Ganzes frei leuchten läßt. Ruhiger wird das Licht, wenn man, wie Martens und Grünbaum empfehlen, die unruhige Kathode abblendet.

Die Nernstlampe kommt für physiologisch-optische Zwecke hauptsächlich in 2 Formen in Betracht:

1. Das isolierte, von keiner Heizspirale umgebene und demgemäß durch Spirituslampe anzuwärmende Stäbchen, das für manche Zweeke zweckmäßig durch ein einfaches Linsensystem in natürlicher Größe oder etwas verkleinert abgebildet wird, so daß das in der Luft schwebende Bildchen als schmale, fast linienförmige Lichtquelle dient. Als solche kann es einen erleuchteten Kollimatorspalt ersetzen, was namentlich für schematische Demonstration eines Spektral- oder Farbenmischapparates auf einer optischen Bank (mit geradsichtigem Prisma) sehr bequem ist. Für exaktere Versuche ist die Abweichung des Stäbchens von der Zylindergestalt ungünstig, und es ist daher nötig, die reelle Abbildung in der Ebene eines Kollimatorspaltes zu entwerfen, dessen Spaltbacken das Bild scharf und parallel begrenzen. Man erreicht so bedeutende Intensitäten. Natürlich darf dabei nur ein kleines Stück der Länge des Stäbchens ausgenutzt werden, da die Strahlung an verschiedenen Stellen ungleich stark sein kann. In der hier erwähnten Weise ist die Nernstlampe von Gullstrand bei einem Farbenmischapparat verwendet worden.

2. Zur konstanten Erleuchtung mehr oder weniger großer Flächen eignen sich die Nernstlampen etwa eben so gut, wie andere elektrische Lampen, sofern die langsame Anwärmung nicht stört. Recht nützlich sind die aus drei übereinander gelegten großen Stäbchen bestehenden Projektions-Nernstlampen, die mit 220 Volt Spannung bis 750 NK ergeben. Die strahlende Wärme ist dabei allerdings bedeutend.

Nachteile der Nernstlampen sind: die starke Abhängigkeit von der Spannung (s. u.), das schnelle und andauernde Absinken der Lichtstärke, die Gefahr von Helligkeitsschwankungen bei Zugluft (wenigstens bei den kleinen Lampen) und die Notwendigkeit, die Lampen dauernd am selben Platz zu lassen, weil die Zuleitung zu den Stäbchen bei Erschütterung der Lampe leicht beschädigt wird.

Eine Kombination mehrerer Nernstlampen kann dazu verwendet werden, eine größere weiße Fläche sehr intensiv und in allen Punkten völlig gleichmäßig zu beleuchten. Man bringt dazu die Lampen in den Innenraum einer innen rein weißen Kugel, in der die Lichtstrahlen derart hin und her reflektiert werden, daß eine gleichmäßige Beleuchtung der Innenwand resultiert. Ist in die Kugelwand ein Loch von nicht zu großen

Dimensionen eingeschnitten, so kann die diesem gegenüberliegende Fläche als gleichmäßig erleuchtet betrachtet werden. Je größer die leuchtende Fläche sein soll, desto größer muß die Kugel sein, da die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung natürlich leidet, wenn ein relativ größeres Stück der lichtreflektierenden Wand ausgeschnitten ist.

Diese dem Photometer von Ulbrich nachgebildete Vorrichtung ist bei meinem, von Fr. Schmidt und Haensch (Berlin) gebauten, Spektralfarbenmisch-Apparat benutzt worden, da es bei diesem darauf ankommt, für 4 Kollimatorrohre, die sich nicht mathematisch genau auf denselben Punkt richten lassen, eine gleichmäßig erleuchtete weiße Fläche als Lichtquelle zu haben. Die Kugel ist aus Porzellan, innen mattgeschliffen, hat ca. 30 cm Durchmesser. Die Öffnung für den Austritt des Lichtes mißt 10 cm im Durchmesser. Drei Nernstlampen mit je 3 Stäben (zusammen etwa 2000 NK ergebend) sind durch 3 weitere Öffnungen in das Innere der Kugel eingeführt, und bestrahlen deren Innenfläche. Hierdurch ist eine gleichmäßige Erleuchtung jeder der Spalten bei beliebiger Weite garantiert und eine auf andere Weise nicht zu erreichende Gleichmäßigkeit des spektralen Gesichtsfeldes bei hoher Intensität erzielt.

Kohlenfaden- und Metallfaden-Glühlampen finden in verschiedensten Formen Verwendung und ihre Eigenschaften sind so bekannt, daß hier nur weniges zu sagen bleibt. Die elektrische Glühlampe bildet eine hinsichtlich der Konstanz geradezu ideale Lichtquelle, wenn sie von einer galvanischen Batterie oder von Akkumulatoren bei konstanter Spannung gespeist wird. Zwar läßt die neue Glühlampe stets schnell an Helligkeit nach, mag der Strom auch noch so konstant sein, aber nach etwa 30 Brennstunden kommt sie zu einem Zustand, in dem die Änderung nur noch so langsam erfolgt, daß sie für die meisten physiologischen Zwecke außer Betracht bleiben kann. Die Abnahme der Helligkeit erfolgt bei den Lampen verschiedener Systeme und selbst bei Exemplaren der gleichen Sorte ungleich schnell, weshalb allgemeine Angaben keinen Wert haben. Daß auch die Angaben über die Helligkeit der Lampen, die von den Fabriken bei der Lieferung gemacht werden, nur ungefähr sind, ist bekannt und wird von reellen Fabriken auch stets bemerkt.

Ich habe stets die Verwendung von Glühlampen geringer Kerzenstärke, 10 bis 16 NK zweckmäßiger gefunden als die der helleren Lampen, weil letztere schneller und in höherem Grade nachlassen. Was ich von 50kerzigen Kohlenfadenglühlampen gesehen habe, war höchst unbefriedigend.

Die neuerdings vielfach gebrauchten Metallfadenlampen bieten zum Teil bedeutende Vorzüge, und nicht nur in ökonomischer Hinsicht, derentwegen sie eigentlich konstruiert sind. Die günstigsten Erfahrungen habe ich hinsichtlich der Osmiumglühlampe, deren Licht weißer ist als das der Kohlenlampe und viel weniger nachläßt, gemacht. Leider scheinen sie sich nicht auf die Dauer halten zu können, sondern durch die nachbenannten verdrängt zu werden, über die ganz genügende Erfahrungen noch nicht vorliegen.

Die „Osram"-(Osmium-Wolfram) Lampen sollen ebenso wie die Tantallampen die Vorzüge der Osmiumlampe teilen und für Erschütterungen weniger empfindlich sein. Irgendwelche Vorzüge für optische Zwecke habe ich bei ihnen bis jetzt nicht finden können. Alle diese Metallfadenlampen vertragen Erschütterungen und Stöße namentlich während des Brennens schlechter als Kohlenfadenlampen, auch brennen sie häufiger als die Kohlenlampen ohne ersichtliche Ursache plötzlich durch. Gleichwohl ziehe ich Osramlampen für stabile Beleuchtung mit größeren Intensitäten den übrigen Glühlampen vor, besonders wenn die Umstände es gestatten, 3 oder 6 Lampen

hintereinander mit niedriger Spannung zu brennen, wobei sie ihre Vorzüge am meisten zeigen.

Für manche Spezialzwecke sehr nützlich sind die geradfädigen Glühlampen, wie sie u. a. von Siemens und Halske geliefert werden. Wenn der Kohlenfaden beim Brennen wirklich geradlinig bleiben soll, muß er durch eine kleine Spiralfeder gespannt werden, da er sich beim Erwärmen und Glühen verlängert.

Eine Methode, den Strom für Glühlampen auf konstanter Stärke zu erhalten, haben Lummer und Brodhun angegeben[44]).

Das Auerlicht (Gasglühlicht, Spiritus- und Petroleumglühlicht) hat gegenüber den Gas- oder Petroleumflammen ohne Glühkörper den Vorteil geringerer Wärmestrahlung bei gleicher Intensität. Für viele optische Zwecke empfiehlt es sich durch seinen relativen Reichtum an blauen und violetten Strahlen. Andere Flammen und elektrische Glühlampen einschließlich der Nernstlampen werden vom Auerlicht hierin beträchtlich übertroffen. Die Leuchtkraft wird auf ca. 80 HK angegeben, doch werden neuerdings namentlich mit Preßgas viel höhere Intensitäten erreicht.

Ein Nachteil des Gasglühlichtes liegt (abgesehen von der Empfindlichkeit des Glühkörpers gegen Erschütterung) in der Inkonstanz, die sich bei Gasdruckschwankungen geltend macht, aber auch ohne solche bemerklich wird, sobald Zugluft die Flamme bewegt, der Glühkörper etwas lose sitzt, und das Verhältnis zwischen Gas- und Luftzufuhr nicht ganz genau richtig ist. Namentlich letzterer Umstand ist oft Quelle von Fehlern, weil mit wechselndem Gasdruck die Luftzufuhr eigentlich geändert werden müßte. Außerdem zieht sich der Glühstrumpf allmählich zusammen. Endlich sind auch die einzelnen Glühkörper ziemlich ungleich in der Qualität des ausgestrahlten Lichtes.

Alle diese Umstände lassen das Gasglühlicht zu längerdauernden wirklich exakten Messungen ungeeignet erscheinen, oder verlangen zum mindesten eine sorgfältige Kontrolle, eventuell Speisung aus einem eigenen Gasometer. Zweckmäßig ist es, den Glühkörper erst etwa 24 Stunden lang in brennender Lampe zu lassen, ehe man ihn zu genaueren Untersuchungen benutzt. Das Petroleum- und das Spiritusglühlicht sind von einer ganzen Anzahl dieser Fehler frei, besitzen dagegen die Vorzüge des Auerlichtes. Sie sind für viele Zwecke sehr zu empfehlen. Auch hier ist aber zu berücksichtigen, daß beim Aufsetzen eines neuen Glühkörpers sich die Zusammensetzung des Lichtes beträchtlich ändern kann.

Die gewöhnlichen Gasflammen (Flachbrenner, Rundbrenner und Lochbrenner) haben mit den Petroleumlampen und Benzinlampen gemein die rötlichgelbe Färbung, bedingt durch geringe Menge der blauen Strahlen. Ein Vorzug ist die hohe Konstanz der Intensität, die sich durch Kontrolle der Flammenhöhe erzielen läßt und die Möglichkeit, ein Licht von derselben Zusammensetzung und sehr nahe gleicher Intensität an verschiedenen Tagen immer wiederherzustellen. Namentlich für die Petroleum- und Benzinflammen gilt das, während man bei Gas doch an vielen Orten mit qualitativen Änderungen an verschiedenen Tagen rechnen muß. Auch sind die Druckschwankungen in der Leitung oft lästig und durch Druckregulatoren nicht absolut zu beseitigen. Für kürzere Zeit kann man durch Verwendung eines eigenen

kleinen Gasometers ein nach Stärke und Zusammensetzung höchst konstantes Licht erhalten. Auch mit Acetylen gelingt das.

Ein Vorteil der Gas- und Petroleumlampen liegt darin, daß man durch Änderung der Flammenhöhe die Intensität in beträchtlichem Umfang ändern kann, ohne die Zusammensetzung merklich zu ändern. Besonders gut eignen sich dazu Gasflammen, die aus einem engen (etwa $^1/_2$ mm weiten) Loch in einem graduierten Zylinder brennen (Pulslampe nach v. Kries). Innerhalb gewisser Grenzen ist die Lichtintensität hierbei proportional der Flammenhöhe [51]).

Durch Hintereinanderstellung mehrerer flacher Dochte bezw. mehrerer Löcherreihen für Leuchtgas läßt sich eine recht beträchtliche Steigerung der Intensität erzielen. So bestehen die von A. König verwendeten „Triplexbrenner" aus drei hintereinander gestellten Gasflachbrennern.

Zirkonlicht und Kalklicht, erzeugt durch Erhitzung eines unverbrennlichen mineralischen Blockes im Knallgasgebläse, sind jetzt durch die modernen Lampen, vor allem die Bogen- und Nernstlampen, fast ganz verdrängt und kommen eigentlich nur da in Betracht, wo kein starker elektrischer Strom zur Verfügung steht. Bei sorgfältiger Regulierung ist die Konstanz wenigstens über kürzere Zeit eine hohe und auch die Intensität beträchtlich. Dabei ist das Licht weißer als das Auerlicht und das gewöhnliche Gaslicht und man hat eine wenigstens annähernd gleichstark strahlende Fläche als Lichtquelle.

Elektrisches Funkenlicht findet zu gewissen Spezialzwecken Verwendung. Zwischen Magnesiumelektroden überspringende Funken eines großen Induktors geben ein an ultravioletten Strahlen sehr reiches, dabei an sichtbaren Strahlen sehr armes Licht, das man durch die unten angegebene Methode der spektralen Zerstreuung leicht ganz von den sichtbaren Strahlen befreien kann.

Geißlersche Röhren mit stark verdünntem Wasserstoff oder Heliuminhalt eignen sich gut zur Eichung von Spektralapparaten. Die zur Eichung brauchbarsten Linien sind folgende:

Wasserstoff: $H\alpha$ (= Fraunhofers Linie C), $\lambda = 656{,}3$; $H\beta$ (= F) $= 486{,}1$; γ (= f) $= 434{,}0$; δ (= h) $= 410{,}2$

Helium*) (706) 667,8; **587,6**; 505; **502**; 492; 471; 447,8.

Auch die Quecksilberlinien lassen sich in Geißlerschen Röhren erzeugen.

Monochromatische durch Metallsalze gefärbte Flammen dienen ebenfalls zum Eichen. Am meisten verwendet werden folgende Linien:

Kalium	769,9; 766,5; 404,6
Lithium	670,8
Natrium	589,6; 589,0 (gewöhnlich rechnet man 589,2)
Thallium	535,0
Strontium	460,8
Quecksilber	(615,2**) 579,0; 576,9; 546,1; 435,8; 407,8; 404,7.

Am bequemsten ist es, die Substanzen in den Winterschen rinnenförmigen Ring zu bringen, der etwa 2 cm über der Öffnung eines Bunsenbrenners befestigt ist. Zu spektralanalytischen Zwecken hat man noch bessere

*) Die Linien, deren Wellenlänge fett gedruckt ist, sind die lichtstärksten.

**) Nur im Funkenspektrum sichtbar.

Vorrichtungen, die aber für die Zwecke der physiologischen Optik wenig in Betracht kommen (vergl. S. 42).

Schwermetalle werden am besten im Funken eines kräftigen Induktoriums verbrannt.

Ich gebe hier noch eine Tabelle nach Martens und Grünbaum wieder, die für eine größere Zahl von Linien die genauesten Bestimmungen enthält.

Tabelle 1.

Nr.	Elem.	λ	Beobachter	Nr.	Elem.	λ	Beobachter
1	Pb	424,542	Exner u. Haschek	17	Pb	537,29	Thalén
2	Hg	435,856	Kayser u. Runge	18	Hg	546,097	Kayser u. Runge
3	Pb	438,711	Exner u. Haschek	19	Pb	560,80	Thalén
4	He	447,18	Runge u. Paschen	20	Hg	576,945	Kayser u. Runge
5	Mg	448,13	Exner u. Haschek			579,049	
6	Sr	460,761	„	21	He	587,60	Runge u. Paschen
7	Zn	468,043	„	22	Na	589,31	(Mittelwert)
8	Zn	472,250	„	23	Sb	600,45	Thalén
9	Cd	480,009	Kayser u. Runge	24	Zn	610,30	„
10	H	486,149	Ames	25	Al	623,4	„
11	Zn	491,20	Thalén			624,4	
		492,46		26	Zn	636,23	Ames
12	N	500,3	„	27	Sn	645,2	Thalén
13	He	501,57	Runge u. Paschen	28	H	656,304	Ames
14	Cd	508,606	Kayser u. Runge	29	He	667,81	Runge u. Paschen
15	Ag	520,925	„	30	Li	670,82	„
16	Tl	535,065	„				

2. Die spektrale Zusammensetzung der Lichtquellen.

Untersuchungen über die spektrale Zusammensetzung verschiedener Lichtquellen liegen nicht für alle üblichen Lichtarten in befriedigender Form vor, insbesondere nicht für die modernsten Lampenarten. Für verschiedene Arten von Petroleum- und Solaröllampen, sowie für Gaslicht, Auerlicht, Zirkonlicht und Himmelslicht hat Else Köttgen[33]) mittels des Königschen Spektralphotometers genaue Angaben gemacht. Dieser Untersuchung sind die folgenden Zahlen und Kurven entnommen.

Die Werte sind auf die Hefner-Lampe und Natriumlicht ($\lambda = 590$) bezogen, in der Art, daß für die betreffende untersuchte Lichtquelle L das Intensitätsverhältnis des Lichtes von der Wellenlänge 590 $\mu\mu$ zur Intensität des gleichen Lichtes bei der Hefner-Lampe (H) bestimmt wurde $= \frac{L_{590}}{H_{590}}$. Alsdann wurde für andere Lichter λ dasselbe Verhältnis $= \frac{L_\lambda}{H_\lambda}$ bestimmt und dieses Verhältnis durch das erste dividiert. Der Quotient $\frac{L_\lambda}{H_\lambda} : \frac{L_{590}}{H_{590}}$ gibt also an, um wie viel stärker das betreffende Licht L_λ in der Lichtquelle L stärker vertreten ist, als in der Hefner-Lampe. Der Wert für $\lambda = 590$ ist $= 1$ gesetzt.

Tabelle 2.

Die spektrale Helligkeitsverteilung bei verschiedenen Lichtquellen, bezogen auf die Hefnerlampe.
Nach Else Köttgen.

		Petroleum-Flachbrenner 5″	Triumph-Patent-Petroleumlampe 20″	Triplex-Gasbrenner (mit Linse)	Siemens-Regenerativ-Gasbrenner	Auer-Gasglühlicht, oberster Teil d. Glühkörpers	Auer-Gasglühlicht, unterster Teil d. Glühkörpers	Zirkonlicht	Sonnenlicht	Weiße Wolke	Schleierwolke	Blauer Himmel
Absolute Intensität in Hefner-Einheiten		9,5	56	—	95	—	—	78	—	—	—	—
Wellenlänge	690 μμ	0,9921	0,9876	1,017	0,8582	0,4415	0,4310	0,8199	0,3064	0,3651	0,2523	0,2059
	670 „	0,9877	0,9812	1,009	0,8780	0,5430	0,5300	0,8757	0,3569	0,4638	0,3319	0,3007
	650 „	0,9851	0,9822	1,003	0,8925	0,6384	0,6185	0,8937	0,4488	0,5621	0,4310	0,3960
	630 „	0,9909	0,9857	1,001	0,9230	0,7445	0,7223	0,9351	0,6039	0,6859	0,5714	0,5304
	610 „	0,9957	0,9903	0,998	0,9517	0,8649	0,8441	—	0,7868	0,8184	0,7607	0,7406
	590 „	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	570 „	1,006	1,028	1,004	1,061	1,162	1,197	—	1,340	1,560	1,573	1,583
	550 „	1,012	1,058	1,008	1,142	1,336	1,463	1,226	1,868	2,141	2,237	2,316
	530 „	1,020	1,097	1,015	1,241	1,533	1,805	—	2,537	2,946	3,219	3,494
	510 „	1,029	1,149	1,022	1,383	1,747	2,267	1,583	3,681	4,304	4,815	5,750
	490 „	1,041	1,196	1,028	1,562	1,948	2,779	—	5,559	6,652	7,388	9,411
	470 „	1,062	1,253	1,033	1,764	2,158	3,475	2,101	8,653	11,87	13,34	18,17
	450 „	1,073	1,309	1,042	1,969	2,367	4,370	—	—	19,85	24,53	38,95
	430 „	1,091	1,372	1,053	2,234	2,610	5,564	3,322	19,180	30,73	36,52	61.63

Fig. 1. Spektrale Helligkeitsverteilung bei verschiedenen Lichtquellen (nach E. Köttgen).

Fig. 1.

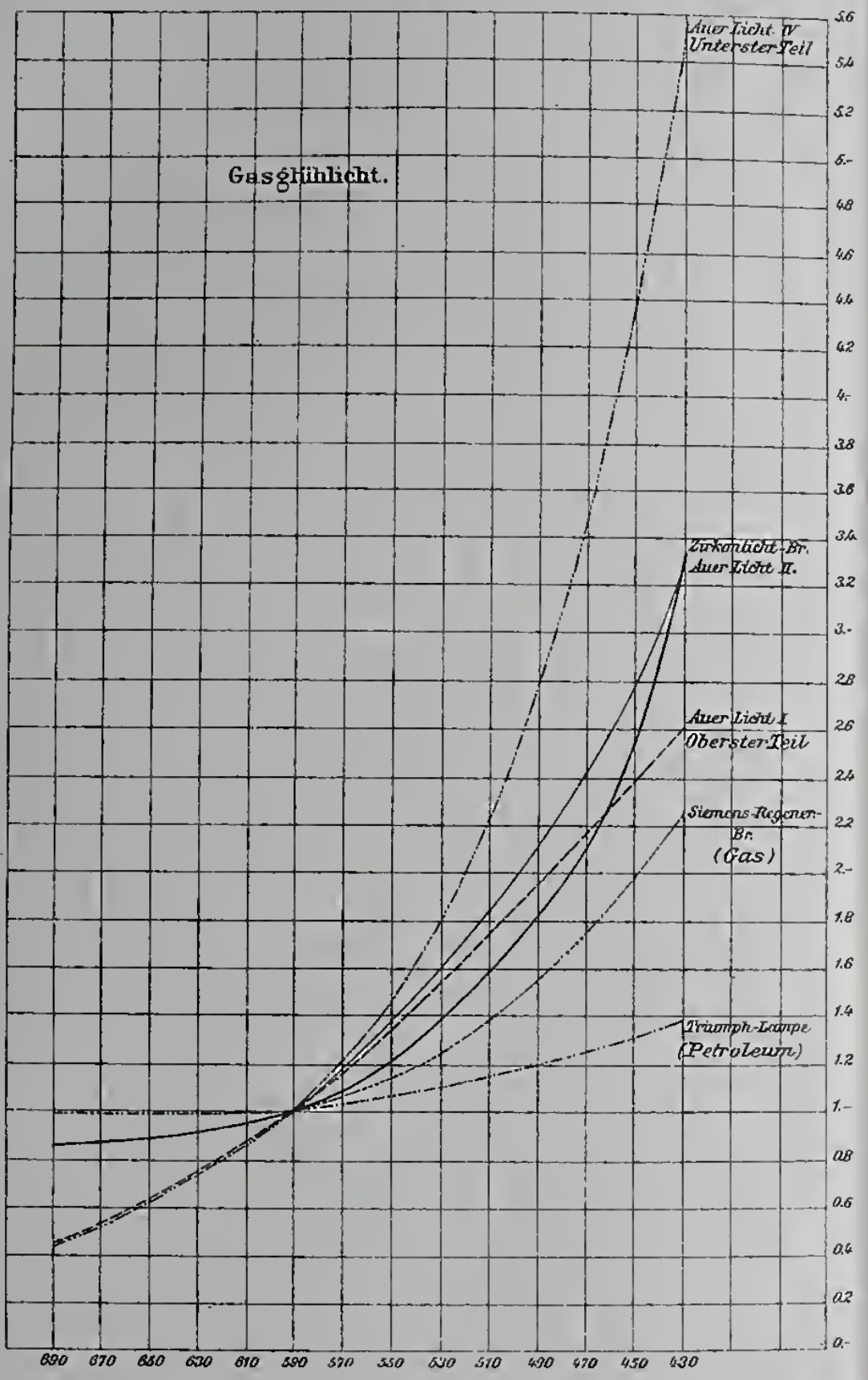
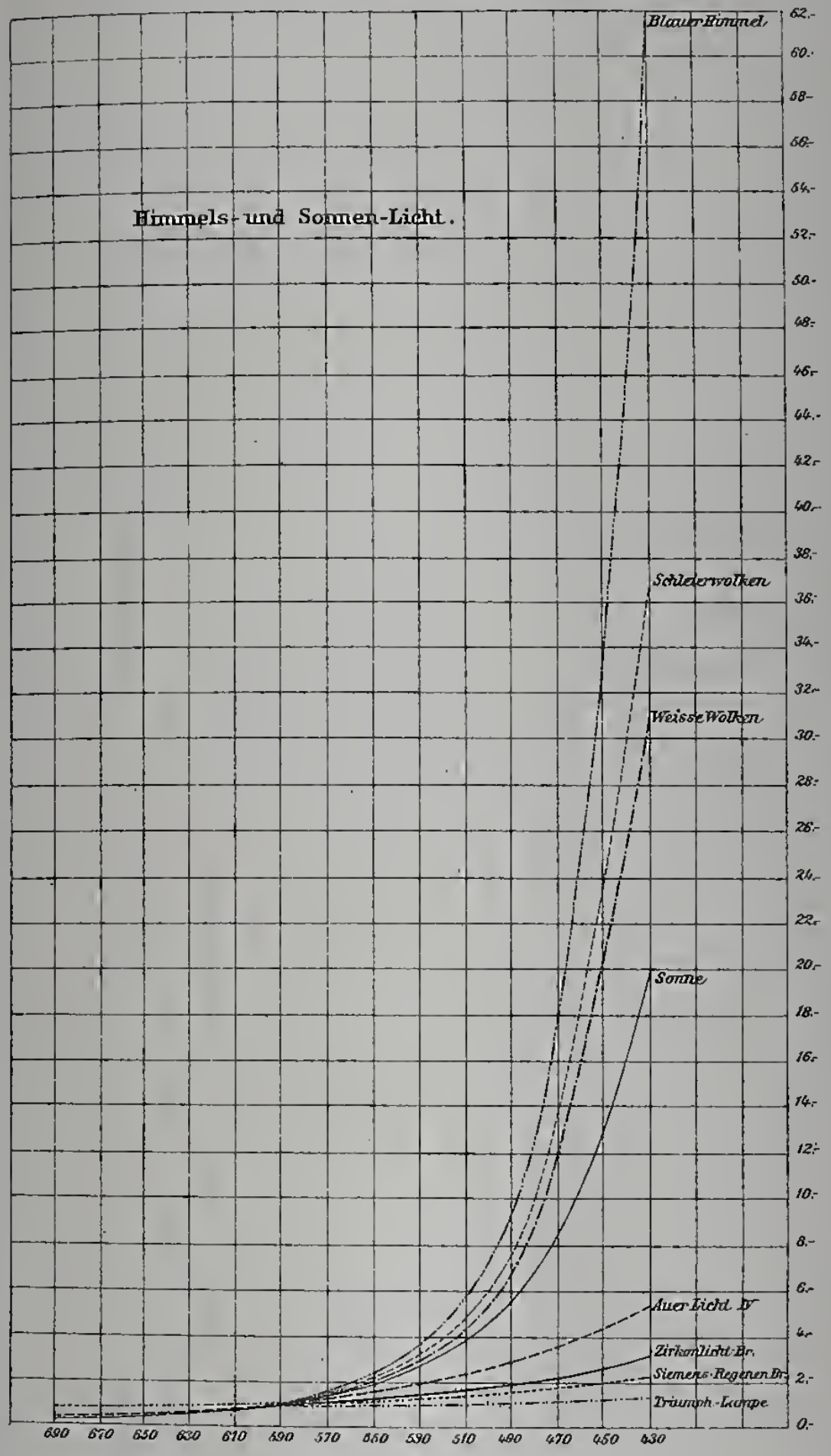


Fig. 2. Spektrale Helligkeitsverteilung bei verschiedenen Lichtquellen, auf die Hefnerlampe bezogen (nach E. Köttgen).

Tafel 1. Zu S. 9.



Naget.

Verlag von S. Hirzel-Leipzig.

Photolithogr. Julius Klinkhardt, Leipzig.

Die Tabelle auf S. 8 zeigt die spektrale Zusammensetzung für eine Anzahl verschiedener Lichtquellen, die Figuren 1 und 2 (s. Tafel I) veranschaulichen dieselben Untersuchungsergebnisse in Kurvenform und zwar ist für die Kurven in Fig. 2 der Maßstab der Ordinaten ein anderer als für Fig. 1. Nicht eingetragen ist die Kurve der Triplexgaslampe, die in dem Maßstab der Fig. 1 fast ganz horizontal verlaufen würde. Rotwärts von 590 erhebt sie sich ein wenig über die Horizontale (der Ausdruck des relativ starken Gehalts an roten Strahlen), während sich die Kurve des Auerlichtes, wie man sieht, im Rot tief senkt; hieraus erklärt sich das grünliche Aussehen des Gasglühlichtes. An blauen Strahlen kommt, wie man sieht, keine der benützten Lichtquellen dem Tageslicht auch nur annähernd gleich.

Wie sich die Lichtqualität in der Abhängigkeit von der Stromspannung bei Kohlefadenlampen und Nernstlampen ändert, hat v. Kries kürzlich durch Marie Boehm[5]) und R. Golant[17]) feststellen lassen. Boehm verglich das Stärkeverhältnis, in dem ein bestimmtes rotes und ein bestimmtes grünes homogenes Licht in der Ausstrahlung der Lampen enthalten ist, u. zw. nach 3 verschiedenen Methoden. Die genaueste ist die der spektralen Mischungsgleichungen. Boehm verwendete die sog. Rayleigh-Gleichung: $a\,L_{589} = b\,L_{671} + c\,L_{535}$. Mit abnehmender Stromspannung brennt die Lampe röter, es muß demgemäß der Grünanteil in der Mischung erhöht werden, um Gleichung mit dem Na-Gelb zu bewahren. Bei Abnahme der Stromspannung von 220 auf 190 Volt änderte sich das Energieverhältnis Rot: Grün bei der Nernstlampe um 10,9 %, bei der Kohlenfadenlampe um 15,8 %. Golant verwendete Purpurgleichungen, d. h. Mischungen aus L_{671} und L_{461}. Auf der einen Seite des Beobachtungsfeldes wurde dieses Gemisch von einer konstant erhaltenen Lampe geliefert, auf der anderen Seite von einer Lampe, deren Stromspannung verändert wurde. Bei Spannungsänderungen von 225 auf 190 Volt änderte sich der Quotient Rot:Blau im Verhältnis 1:1,2 bis 1,3, (bei verschiedenen Nernstlampen).

In der Freiburger Lichtstromleitung wurden oft schnelle Spannungsänderungen bemerkt, gewöhnlich zwischen 222 und 228 Volt (manchmal 216 zu 235 Volt). Danach ist mit Schwankungen des Rot:Blau-Verhältnisses um 10 % zu rechnen.

Wie man aus diesen Angaben sieht, sind die einzelnen Lampen sehr ungleich. Die schon mit bloßem Auge zu machende Beobachtung, daß Nernstlampen (wie auch die Kohlefadenlampen) bei langem Brennen immer mehr von der Stromspannung abhängig werden, bestätigte Golant, indem sie eine Nernstlampe 760 Stunden brennen ließ. Das Verhältnis des Rot:Blau bei 225 Volt zu demjenigen bei 190 Volt stieg in dieser Zeit von 1,227 auf 1,405.

Für Untersuchungen an Lichtquellen mit Hilfe der Rayleigh-Gleichung, nach Art der von Boehm ausgeführten, dürfte sich mein „Anomaloskop" besonders empfehlen, in dem die Mischung Li + Tl fest eingestellt ist (s. u. S. 74).

Henius hat auf meine Veranlassung einige gebräuchliche Lichtquellen mit dem Anomaloskop (Modell II) untersucht. Die in folgender Tabelle angegebenen Zahlen geben das Verhältnis der Rotmenge zur Grünmenge in einem Lichtgemisch von $\lambda = 671$ und $\lambda = 536$ an, das dem Natriumlicht gleich aussehend gemacht ist.

Gasglühlicht, neu	3,9	Kohlefaden-Glühlampe, alt	1,5
„ 11 Stunden gebrannt	3,9	Tantallampe, neu	1,9
Spiritusglühlicht	3,7	Nernstlampe Nr. I, neu	2,7
Triplexgasbrenner		7 St. gebrannt	3,7
14 cm Flammenhöhe	1,4	$7^1/_4$ „ „	3,8
16 cm „	1,8	$10^3/_4$ „ „	3,4
Argand-Gasbrenner	1,6	$11^1/_4$ „ „	2,5
Petroleumrundbrenner	1,3	Nernstlampe Nr. II	1,9
Hefnerlampe	1,8		2,1

Die Tabelle bringt die verschiedene Qualität der Lichtarten gut zum Ausdruck. Das Gasglühlicht mit seinem Reichtum an grünen und kurzwelligen Strahlen erfordert größere Spaltweite für den das rote Licht liefernden Spalt, kleinere für den Grünspalt. Bei röteren Lichtquellen sinkt der Quotient bedeutend. Die Tabelle zeigt ferner die gute Konstanz des Auerbrenners in seinen ersten 11 Brennstunden, auch die große Veränderlichkeit der Nernstlampe, bei der anfangs der Quotient schnell steigt, um schon in der 11. Stunde wieder zu sinken.

Ähnliche Messungen habe ich in der kurzwelligen Spektralhälfte ausführen lassen.

II. Vorrichtungen zur Abstufung der Licht-Intensität.

Die Intensität, mit der die Strahlung einer Lichtquelle das Auge oder irgendeine zu beleuchtende Fläche trifft, reguliert man auf drei Arten:

a) durch Veränderung der Intensität der Lichtquelle selbst;
b) durch Veränderung des Abstandes;
c) durch Einschiebung bezw. Entfernung besonderer Abschwächungseinrichtungen.

Zu gröberen Änderungen eignen sich natürlich alle drei Arten. Hier interessieren sie nur, soweit sie eine hinreichend exakte Abstufung zulassen.

1. Abstufung der Lichtintensität durch Regulierung der Lichtquellen.

Die Lichtintensität der Lichtquellen selbst läßt sich, wie oben erwähnt, bei langen schmalen, aus engem Loch brennenden Gasflammen, und ebenso auch bei Benzinkerzen, die aus rundem Wolldocht brennen, durch Änderung der Flammenhöhe ziemlich exakt variieren, wenn auch nur in beschränktem Umfang. Bei Rund- und Flachbrennern ist quantitative Verwertung der Helligkeitsänderung ausgeschlossen, erst recht natürlich bei Auerbrennern. Elektrische Glühlampen, deren Helligkeit durch Vorschaltwiderstände abgestuft wird, sind für messende Versuche noch weniger zu brauchen, als Gas- oder Petroleumlampen, weil sie mit der Intensität zugleich die spektrale Zusammensetzung sehr wesentlich ändern. Wollte man bei Lichtsinnsprüfungen und dergl. elektrische Glühlampen mit „Dunkelsteller“ verwenden, so könnte man unter Umständen bedeutende Fehler in den Versuch hinein bringen. Die Untersuchungen Auberts über Schwellen des Lichtsinnes, bei denen ein glühender Platindraht als Lichtquelle diente, leiden an dieser Fehlerquelle, die gerade bei Schwellenbestimmungen große Irrtümer bedingen muß.

2. Abstufung der Beleuchtungsintensität durch Änderung des Lampenabstandes

verlangt, wenn sie exakt sein soll, große Vorsicht. Eine nach allen Seiten strahlende Lampe läßt sich dazu höchstens in einem sehr großen, sowohl

langen wie breiten Dunkelraume verwenden, weil in kleineren Räumen selbst gut mattschwarz gestrichene Wände merkliche Lichtmengen reflektieren und überraschend große Fehler bedingen. Geht die Verschiebnng der Lampe auf einer geraden Bahn vor sich, so kann durch röhrenförmige Abblendungen die Bestrahlung der Umgebung nnd damit der Fehler bedeutend vermindert werden.

Bei Gasglühlicht muß daran gedacht werden, daß Bewegung der Lampe die Stellung des Glühkörpers und damit die Helligkeit ändern kann. Auch bei elektrischen Lampen, die auf einer Photometerbahn bewegt werden, kann die Leuchtkraft durch Lockerung von Kontakten bedeutend verändert werden. Wo es also angängig ist, empfiehlt es sich immer, die Lampe stehen zu lassen und das zu beleuchtende Objekt zu verschieben; eventuell kann auch die Lampe in einem Spiegel reflektiert und dieser verschoben werden.

3. Die besonderen Vorrichtungen zur Abschwächung des Lichtes zerfallen in folgende Hauptgruppen:

Absorbentien (Milch-, Matt- und Rauchglas etc.);
Blenden (und Spaltvorrichtungen);
Polarisationsvorrichtungen;
Episkotister.

a) Absorbentien. Von Absorbentien bleiben hier die selektiv wirkenden, die sog. Lichtfilter, außer Betracht (s. über sie unten S. 43). Ihr Gegenstück sind solche Absorbentien, die möglichst gleichmäßig alle Strahlen wenigstens des sichtbaren Spektrums absorbieren. Für sehr geringe Abschwächung (auf $^3/_4$ bis $^2/_3$) gelingt dies recht gut mit mattiertem Glas. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Mattgläser kann man beträchtlichere Abstufung erhalten, muß aber berücksichtigen, daß die meisten Glassorten eine leichte Färbung haben, die sich in der einzelnen Platte noch nicht bemerklich macht, wohl aber bei der Häufung mehrerer.

Wohl zu betrachten ist ferner, daß der Absorptionswert des Mattglases sich bedeutend vermindert, wenn es naß oder fettig wird, daß er andererseits steigt, wenn es verstaubt und beim Abwischen die Staubteilchen in den Unebenheiten der matten Seite festgedrückt werden. Der Verdunklungswert einer Mattglasscheibe darf also nicht ohne weiteres als eine Konstante betrachtet werden.

Milchglas zeigt diese Schwierigkeiten in der Behandlung nicht, dagegen hat es die Schattenseite, daß seine Absorption eine mehr oder weniger selektive ist. A. Pflüger[53]) hat zwar angegeben, das ganze Spektrum werde gleichmäßig geschwächt; bei den von mir geprüften Gläsern war aber stets eine merklich größere Durchlässigkeit für Rot zu konstatieren.

Beispielsweise finde ich bei einer 25 kerzigen Tantallampe das Verhältnis von Rot ($\lambda = 671\,\mu\mu$) zu Grün ($536\,\mu\mu$), bei dem Gleichung mit $\lambda = 589$ zustande kommt, $= 1{,}73$ bei Einschaltung eines Mattglases, dagegen $= 1{,}63$ bei Einschaltung einer Milchglasscheibe. Das bedeutet eine recht erhebliche relative Schwächung des Grün durch das Milchglas.

Rauchglas färbt das Licht gewöhnlich ebenfalls, bald rötlich, bald grünlich, bald bläulich. Neutralgraue Stücke sind nicht leicht zu haben, und wenn sie fürs Auge so aussehen, ist damit noch nicht gesagt, daß die spektrale Prüfung nicht bedeutende Ungleichmäßigkeiten in der Schwächung nachweisen könnte,

die sich fürs Auge aufheben. Rauchglas eignet sich daher nur für gröbere Zwecke zur Verdunklung. Das gleiche gilt von schwärzlichen Flüssigkeiten sowie von Aufschwemmungen von Tusche in geschmolzener Gelatine, wie sie Oltmanns (Flora, 1892, S. 183) verwandt hat, um eine keilförmig sich verdickende Absorptionsschicht herzustellen.

Die verschiedene Durchsichtigkeit des Rauch-, Matt- und Milchglases bedingt gewisse, bei quantitativen Bestimmungen nicht zu vernachlässigende Unterschiede.

Nehmen wir an, eine Lichtquelle L (Fig. 3) sende Licht nach allen Seiten, u. a. also auch auf die Fläche AB. Auf den Punkt P der Fläche AB trifft, wenn keine Reflexionen im Spiel sind, ausschließlich der Strahl LP. Alle anderen Strahlen, die von L ausgehen, gehen für die Beleuchtung von P verloren. Wird in den Strahlengang eine als vollständig durchsichtig angenommene Scheibe CD aus Rauchglas eingeschoben, so vermindert sich für jeden Punkt von APB die Beleuchtungsintensität um ein bestimmtes Maß, das von dem Absorptionswert des Glases CD abhängt. Die Größe des Glases CD ist ganz gleichgültig, wenn sie nicht unter die Größe cd sinkt. Auch für die Gesamtmenge von Licht, die auf die Fläche AB fällt, ist die Größe des Absorptionsglases gleichgültig, sobald sie nicht kleiner wird als cd.

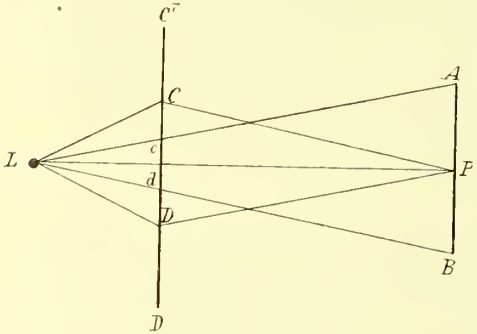


Fig. 3.

Ganz anders liegen die Verhältnisse, wenn CD eine Milchglasplatte ist. Dann ist die Bestrahlung von P oder der ganzen Strecke AB durchaus nicht unabhängig von der Größe der Milchglasscheibe. Zwar deckt schon die Scheibe cd die ganze Fläche AB, von L aus betrachtet. Die Beleuchtung von AB wird aber auf jedem Punkt stärker, wenn die größere Platte CD (die = AB gedacht ist) statt cd eingeschoben wird oder gar C′D′.

Der Grund ist leicht einzusehen. Die Milchglasplatte wirkt im Gegensatz zur Rauchglasplatte diffundierend; auf den Punkt P fällt nicht mehr allein der Strahl LP, sondern auch der Strahl Lc oder LC trifft auf eine lichtdiffundierende Stelle, von wo Strahlen nach allen Richtungen, also auch nach P, hingehen. Die Gesamtlichtmenge, die auf jeden Punkt der Fläche AB fällt, ist also wesentlich größer, als der Wert, den man erhält, wenn man einfach die Schwächung des direkten Strahles LP durch die Milchglasscheibe in Rechnung zieht. So selbstverständlich dies ist, verdient es doch Erwähnung, weil Anfänger bei ihren Versuchsanordnungen zuweilen nicht an die verschiedene Art der Lichtabschwächung durch Rauchglas und Milchglas denken.

Mattglas steht in Bezug auf die Durchsichtigkeit zwischen Rauch- und Milchglas in der Mitte und ergibt dadurch besonders komplizierte Verhältnisse. Ist CD ein Mattglas, so sind die Strahlenrichtungen LA bis LB wesentlich begünstigt gegenüber Strahlen, die von irgend welchen Punkten der Platte C′D′, z. B. C oder D nach AB hin ausstrahlen. Immerhin wird P stärker

beleuchtet, wenn das Mattglas die Größe CD hat, als wenn es nur die Größe cd hat.

Es gibt Milchgläser, die insofern ähnlich wie Mattgläser wirken, als sie zwar diffundierend wirken, doch aber in gewissem Grade durchsichtig sind. Durchsichtig sind sie insbesondere für rote Strahlen. Durch solche Gläser, die meist etwas bläulichweiß aussehen und den Übergang zu den Opalgläsern bilden, sieht man z. B. den Kohlenfaden einer Glühlampe vollkommen scharf, also wie durch Rauchglas, und zwar rot. Die Verwendung solcher Milchglasscheiben als Absorbentien könnte zu beträchtlichen Irrtümern führen, um so mehr als man es den Stücken nicht immer ohne weiteres ansieht, ob sie gleichmäßig diffundieren oder nicht, was besonders bei Kombination mit Blenden (s. u.) sehr wichtig ist.

Erwähnt sei, daß man bei Mattgläsern die Durchsichtigkeit vermindern, die Diffusionswirkung also steigern kann, indem man 2 Stücke mit ihren glatten, nichtmattierten, Seiten gegeneinander legt.

In manchen Fällen, zu gröberen Versuchen, kommt Schreibpapier und ähnliches Material als Absorbens zur Verwendung, wo es auf ganz gleichmäßiges Feld nicht ankommt und rötlichgelbe Färbung, wie sie Papier in der Durchsicht meist hat, nicht schadet. Zu beachten ist die schnelle Veränderung der Durchsichtigkeit und Färbung des Papiers, das unter der Einwirkung von Licht und Luft steht.

Kombination mehrerer absorbierender Scheiben. Die Hintereinanderschaltung mehrerer Platten wirkt bei Rauch-, Matt- und Milchglas u. U. verschieden. Setzt man zwei absolut durchsichtige Rauchgläser hintereinander, so multipliziert sich einfach ihre Verdunklungswirkung. Schwächt z. B. ein Glas das weiße Licht auf $\frac{1}{2}$, das zweite auf $\frac{2}{3}$, so schwächen sie, hintereinander gelegt, auf $\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{3} = \frac{1}{3}$. Dabei macht der Abstand der Gläser voneinander und von der Lichtquelle sehr wenig aus, wenn sie untereinander parallel und senkrecht zur Strahlenrichtung stehen. In diesem Falle bedingt nur die niemals vollkommene Durchsichtigkeit kleine Abweichungen. Größere auf der Reflexion beruhende Fehler können hinzukommen, wenn die Gläser schief im Strahlengang stehen.

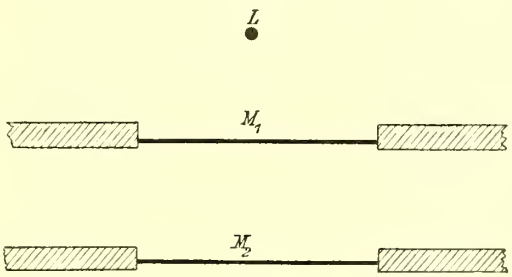


Fig. 4.

Bei Milchglas kommen die in Fig. 3 erläuterten Verhältnisse in Betracht. Fig. 4 zeigt, wie sich die Lichtverteilung bei Kombination zweier Platten darstellt. Bestrahlt das Licht L die Milchglasscheibe M_1, die seitlich von undurchsichtigem Material umgeben ist, und fällt das von M_1 durchgelassene

Licht auf eine zweite ebenso angeordnete Milchglasplatte M_2, so ist die von M_2 schließlich durchgelassene Lichtmenge sowie die Helligkeit der Fläche M_2, von O aus gesehen, außer von dem spezifischen Absorptionsvermögen der beiden Platten M_1 und M_2 auch von dem Abstand zwischen M_1 und M_2 bestimmt, indem M_1 als Lichtquelle statt L eintritt. Diese Lichtquelle ist nun flächenhaft ausgedehnt, und die Lichtmenge, die sie auf M_2 ausstrahlt, ist proportional der Flächengröße von M_1; ist der Abstand der beiden Platten voneinander groß genug, so resultiert eine gleichmäßige Verteilung der Lichtmenge auf M_2. Ist der Abstand aber klein, so wird die Beleuchtung von M_2 ungleichmäßig, sobald die Fläche M_1 kleiner ist als M_2. Dies spielt bei der unten zu besprechenden Methode der Helligkeitsregulierung durch Blenden eine Rolle.

Während es nach dem Gesagten für ein System von mehreren hintereinander gestellten gut diffundierenden Milchglasplatten leicht möglich ist, die Beleuchtungsintensität der letzteren aus dem Absorptionsvermögen der einzelnen Platten, ihrer Größe und ihrem Abstand rechnerisch zu ermitteln, wird dies bedeutend schwieriger, wenn es sich um halbdurchsichtige Platten, wie Mattglas handelt, das daher ebenso wie dünnes Milchglas nur mit Vorsicht zu gebrauchen ist, wo quantitative Bestimmungen beabsichtigt werden.

b. Blenden (Diaphragmen). Zur genauen Regulierung der Beleuchtung einer Fläche verwendet man häufig Blenden und zwar entweder in der Weise, daß man durch sie die lichtausstrahlende Oberfläche einer diffusen Lichtquelle, etwa einer von hinten her erleuchteten Milchglasscheibe reguliert, oder indem man sie in ein Linsensystem einschaltet, in dem sie den Querschnitt des Strahlenkegels und damit die durchgelassene Lichtmenge verändern.

Für ersteren Fall kommen die im vorigen Kapitel besprochenen Eigenschaften der durchscheinenden Medien besonders in Betracht und es ist selbstverständlich, daß man das einfache Gesetz für die Wirkung einer Blende vor einer leuchtenden Fläche: die Beleuchtungsintensität ist proportional der von der Blende freigelassenen Fläche — nur dann verwirklicht findet, wenn erstens die leuchtende Fläche in allen Punkten gleich viel Licht aussendet und sie zweitens das Licht vollkommen zerstreut, wie es wohl dichtes Milchglas tut, nicht aber Mattglas oder halbdurchsichtiges Milchglas.

Besonders beliebt sind wegen ihrer Bequemlichkeit die Irisblenden, die in verschiedenen Größen gefertigt werden (von Zeiss in Jena z. B. auch große von 10 und 16 cm Maximaldurchmesser). Am Rande kann eine Skala angebracht werden, die entweder den jeweiligen Blendendurchmesser oder den Flächeninhalt der Blendenöffnung in Quadratmillimetern angibt.

Für Präzisionsmessungen eignet sich die Irisblende wegen der unvermeidlichen Abweichung von der Kreisform und sonstigen kleinen Mängel nicht. Dagegen läßt sich die quadratische Blende in Form des sogenannten Aubertschen Schiebers (zuerst von Förster angewandt) sehr exakt herstellen. Die beiden Metallteile, welche die quadratische Öffnung begrenzen, gleiten dicht an einer Milchglasscheibe und werden meistens durch Zahnrad und Zahnstange oder durch Schraubengewinde bilateral-symmetrisch gegeneinander bewegt.

Funktioniert eine Milchglasscheibe oder eine ähnliche größere gleichmäßig helle Scheibe als Lichtquelle, von der aus eine andere Fläche bei

konstantem Abstand verschieden stark beleuchtet werden soll, so geht zuweilen die Anbringung einer Iris- oder Quadratblende deshalb nicht an, weil die beiden Scheiben so nahe aneinander stehen, daß die zweite Scheibe von der ersten bei enger Blendenstellung nicht mehr gleichmäßig erhellt würde. In solchem Fall kann man Scheiben mit vielen Löchern vorsetzen, gewissermaßen eine Mehrzahl fester Blenden, die über die Fläche gleichmäßig verteilt sind. Statt einer kreisförmigen Blende von 4 cm Durchmesser schiebt man z. B. eine Platte mit 16 Löchern von $^1/_2$ cm Durchmesser ein, wodurch man dieselbe Lichtmenge auf eine größere Fläche verteilt. Die aus der Summe der Lochweiten berechnete Beleuchtungsintensität stimmt aber nicht genau mit der wirklichen, wenn der Abstand der Löcher voneinander zu groß wird.

Eine Spezialform der Blenden sind die Spaltvorrichtungen, auf die hier nur noch kurz eingegangen werden soll.

Dicht vor das Auge gesetzte Spalte, die in der Höhe oder der Breite, oder in beiden Richtungen vergrößert oder verkleinert werden können, werden mit Vorteil dann zur Helligkeitsvariierung verwendet, wenn diese erstens nicht sehr beträchtlich sein und zweitens nicht genau gemessen werden soll und wenn die Versuchsanordnung sicher so zu treffen ist, daß der Spalt in keiner Dimension den Durchmesser der Pupille des Beobachters erreicht. Bei nicht quantitativen Versuchen ist der letzterwähnte Punkt ohne Bedeutung.

Wo es auf genaue Messung von Spaltweiten ankommt, muß die Verstellung des Spalts durch eine sehr feine Mikrometerschraube mit Ablesetrommel bewirkt werden. Die Kontrolle der richtigen Lage des Nullpunktes erfolgt am besten so, daß man den Spalt mit homogenem Licht (Natriumflamme) erleuchtet, durch eine Linse reell abbildet und nun dieses in der Luft schwebende Bild mit der Lupe betrachtet. Man kann dann sehr genau die Stellung bestimmen, bei der der Spalt sich eben schließt und auch den toten Gang der Schraube kontrollieren.

Bei feinen Spaltvorrichtungen stoßen die Spaltbacken nicht flächenförmig gegeneinander, sondern mit mehr oder weniger scharfen Schneiden (Gravesandsche Schneiden). Um deren Beschädigung durch zu starkes Zudrehen zu verhindern, „entlastet“ man die Spaltbacken, indem man es so einrichtet, daß in dem Moment, wo der Spalt sich schließt, die Schraube aufhört zu wirken und der Spaltschluß nur durch eine kleine Spiralfeder aufrecht erhalten wird.

In vielen Fällen ist es nötig, daß die beiden Spaltbacken sich symmetrisch von der Schlußlinie des Spaltes entfernen, bezw. ihr nähern, sogenannte Bilateralspalte. Die Schraubenspindel trägt in diesem Falle zwei in entgegengesetzter Richtung laufende Gewinde, deren jedes eine Spaltbacke bewegt.

Arbeitet man mit kleinen Spaltweiten, so ist sehr auf Reinheit der Spalträuder und das Fehlen von Scharten in diesen zu achten, da ein Stäubchen schon einen merklichen Teil des engen Spaltes verdecken, eine Scharte die durchgelassene Lichtmenge in nicht zu berechnender Weise vermehren kann. Feine Spalte müssen daher vor Staub und Berührung geschützt werden.

c. Polarisationsvorrichtungen. Ein Paar Nicolscher Prismen, deren Kreuzungswinkel variiert und genau abgelesen werden kann, eignet sich namentlich für feine Intensitätsabstufungen von nicht zu hohem Betrage, z. B. in Spektralapparaten, bei denen man Wert darauf legt, daß der Kollimatorspalt konstante Weite hat. Der Nullpunkt der Skala muß sehr sorgfältig bestimmt sein. Das Strahlenbüschel muß möglichst genau parallelstrahlig in das Nicolpaar eintreten.

d. Episkotister. Diese von Aubert[1]) angegebene Verdunklungsvorrichtung kommt besonders dann in Betracht, wenn in den Strahlengang keine Glasschicht eingeschoben werden soll. Er besteht aus zwei geschwärzten Metallscheiben, in deren jeder 4 Oktanten ausgeschnitten sind, wie in Fig. 5 und 6 (oder 2 Quadranten). Die Scheiben sitzen auf der gleichen Achse, gegeneinander drehbar, so daß verschieden große Stücke jedes der Oktanten (Quadranten) frei für den Durchtritt des Lichtes bleiben. An einem Gradbogen liest man die Sektorenbreite ab (Fig. 6).

Fig. 5.

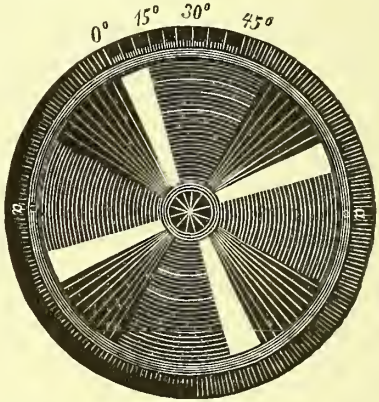


Fig. 6.

Episkotister nach Aubert.

Ein Elektromotor oder Uhrwerk dreht den Episkotister. Damit ein konstantes flimmerfreies Licht gesehen wird, muß ein Episkotister mit Oktantenausschnitten mindestens 12, besser 20 Umdrehungen pro Sekunde machen, wenn es sich um erhebliche Helligkeiten handelt. Beobachtet man bei Helligkeiten, die unter der fovealen Schwelle liegen, so kann, wegen der trägen Reaktion des Dämmerungsapparates (Stäbchen) die Rotation etwas langsamer sein. Es empfiehlt sich im allgemeinen, die Rotation nicht überflüssig schnell zu machen, weil die Motoren bei den geringen Geschwindigkeiten meistens leiser laufen.

Der Episkotister ist besonders dann am Platz, wenn es sich nicht um häufig zu ändernde Intensitäten handelt, sondern um die Herabsetzung einer gegebenen Intensität um einen festen Betrag, etwa auf $^1/_{50}$ oder $^1/_{100}$. Zeigt die Lichtquelle selbst periodischen Wechsel (Wechselstrombogenlampen!), so ist wegen der auftretenden Helligkeitsschwebungen der Episkotister meist nicht zu brauchen.

III. Versuche über Lichtsinn.

1. Dunkeladaptation.

Lichtabsehluß im Dunkelzimmer. Die Hauptschwierigkeit bei der Herstellung eines absolut dunklen Zimmers pflegt in dem Fensterversehluß zu liegen, wenn die Fenster zum zeitweiligen Öffnen eingerichtet sein sollen. Die einfachste Methode, mit der man den Zweck sieher erreiehen kann, ist ein Rollvorhang aus diekem schwarzen Tueh, der in tiefen Fugen (mindestens 8—10 cm tief) läuft und diese fast ganz ausfüllt. Unten muß er, wenn er dicht sehließen soll, in eine breitere, aber mindestens 30 cm tiefe Fuge sich einsenken.

Für andere Fälle empfehlen sieh Klappläden mit hölzernen Rahmen und Füllungen aus Zinkbleeh. Gut gearbeitet, geben aueh sie völligen Lichtabsehluß und haben nebenbei den Vorzug, daß man in die Füllungen Spaltvorriehtungen, Aubertsehe Sehieber, Milchglas oder Farbglasplatten ete. einsetzen kann.

Lichtabschluß eines Auges zum Zweck der Dunkeladaptation ist leicht mittels der bekannten schwarzen Hohlschalen aus Pappe oder Celluloid am Gummiband zu erzielen, sofern es sich nicht um absoluten Lichtabschluß handelt. Letzterer ist nieht ganz leieht zu erzielen, denn selbst eine vollkommen lichtdieht ansehließende Hohlsehale mit gepolstertem Rande genügt dazu nicht. Nach halbstündigem Verschluß bemerkt man leieht, daß durch die Kopfknoehen, besonders die Gegend der Stirnhöhle, Licht in beträehtlicher Menge durchdringt. Mehrere Lagen schwarzen Samtes mit Binde über der Schale befestigt schließen dies Licht hinreichend aus. Für längerdauernden völligen Absehluß lege ieh auf das Auge erst 2 bis 3 Sammetstücke mit Ausschnitten in der Größe des Auges, darüber dann die Hohlschale, die mit Sammet bedeckt und durch eine Binde fest angedrückt wird. Auf diese Weise wird nicht nur der Augapfel selbst nicht gedrückt (was beträchtliehe Sehstörungen bei nachfolgenden Versuchen bewirken würde), sondern aueh seine Umgebung vor dem bei längerer Adaptation lästigen Druck bewahrt.

2. Helladaptation.

Den Adaptationszustand, den man in einem tageshellen Zimmer oder gar in einem künstlich beleuehteten Raume ohne besondere Vorkehrungen erreicht, ist nicht der der vollen Helladaptation, worunter ich einen solchen verstehe, bei dem das Purkinjesche Phänomen auch nicht in leisesten Andeutungen auftritt und sich erst nach Lichtabschluß von mindestens 1 Minute in den ersten Spuren bemerklich maeht. Diese gänzliche Ausschaltung des Dämmerungsapparates im Auge erreicht man im Sommer bei Sonnenschein durch mindestens $^1/_4$stündigen Aufenthalt im Freien auf sonnenbeschienenem Platz. Im Winter erreieht man volle Helladaptation nur unter günstigen Umständen.

Zu berücksichtigen ist, daß die peripheren Netzhautteile viel weniger vom Licht getroffen werden, und daher bei kurzem Aufenthalt im Hellen noch einen beträchtlich höheren Grad von Lichtempfindlichkeit haben können, als die zentralen und parazentralen. Namentlich wenn man durch Bliek aus

dem Fenster ins Freie Helladaptation zu bewirken sucht, erhält man oft überraschend große örtliche Unterschiede im Adaptationszustand.

Für die Verwendung künstlichen Lichtes zur Helladaptation hat sich mir die nachstehend beschriebene Vorrichtung bewährt. In einem hohlen Holz- oder Blechrahmen sind 12 bis 16 Glühlampen kranzförmig eingesetzt und die offene Seite des Rahmens wird gegen eine weiße Fläche gerichtet, die etwa 40 cm davon entfernt steht. Durch den Rahmen blickt man (mit wanderndem Blick, um Nachbilder zu vermeiden!) auf die weiße Fläche, der man mittels der Lampen leicht eine Beleuchtungsintensität von 500 bis 2000 MK geben kann.

So kann man in 10 bis 20 Minuten einen mittleren Teil der Netzhaut von etwa 30° gut helladaptieren, wenn auch nicht so weitgehend, wie in der Sonne im Freien. Stärkere Helladaptation auf möglichst großer Fläche erzielt man, wenn man in ein Brillengestell ein Mattglas oder dünnes Milchglas einsetzt, die Brille aufsetzt und nun das Glas von Gasglühlicht aus kleiner oder von einer Bogenlampe*) aus größerer Entfernung bestrahlen läßt.

Homatropinlähmung der Iris erhöht die Wirkung aller dieser Belichtungen natürlich sehr erheblich.

3. Fixierpunkt.

Bei zahlreichen Versuchen über Licht und Farbensinn ist Einhaltung einer bestimmten Blickrichtung notwendig; ohne einen markierten Fixierpunkt ist dies nicht sicher zu erreichen.

Beim Blick auf helle Flächen ist es leicht, durch einen dunklen Fleck, eventuell durch ein Fadenkreuz oder einen Faden mit Knoten die Blickrichtung zu fixieren. Schwieriger ist es im Dunklen, namentlich wenn es sich um foveale Schwellenbestimmungen oder überhaupt um Beobachtungen mit den zentralen Netzhautteilen handelt. Ein zu heller Fixierpunkt würde hier störend wirken, während ein nur wenig über der Schwelle liegender punktförmiger Lichtreiz die Schwellenbestimmungen im fovealen Gebiet nicht nur nicht stört, wie behauptet worden ist, sondern sogar häufig niedrigere Schwellenwerte ergibt, als wenn der Fixierpunkt fehlt.

Ein lichtschwacher Fixierpunkt muß, um wirklich die Fixation auf sich zu lenken, möglichst nur rote Strahlen aussenden. Im Zustand der Dunkeladaptation erscheinen alle nicht roten Lichter mit der Fovea fixiert viel dunkler als extrafoveal und nur die langwelligsten roten Strahlen bleiben auch bei Dunkeladaptation für die Fovea wirksamer als für die Peripherie. Bei guter Helladaptation dagegen sinkt die Empfindlichkeit für alle Lichtarten von der Fovea zur Peripherie; in diesem Zustand ist also die Qualität des Fixierpunktlichtes von geringerer Bedeutung, wenn auch ein roter Punkt immer am sichersten die Fixation auf sich zieht.

Flecke von Leuchtfarbe als Fixierpunkte zu verwenden, wie es öfters geschehen ist, ist widersinnig. Das Phophoreszenzlicht enthält überwiegend mittel- und kurzwellige Strahlen, und wirkt dementsprechend so

*) Vorsicht wegen der Gefahr für das Auge, namentlich wenn keine dicke Wasserschicht eingeschaltet ist!

wie etwa ein lichtschwacher blaugrüner Punkt auf ein dunkeladaptiertes Auge, d. h. es veranlaßt den Beobachter, es mit nichtfovealen Teilen zu betrachten. Solche „Fixierpunkte“ aus Leuchtfarbe bewirken also das Gegenteil von dem, was ein Fixierpunkt bewirken soll.

Für manche Fälle eignen sich kleinste, durch rotes Glas gesehene, Gasflämmchen oder Glühlämpchen, auch kurze Schlingen aus Platindraht.

Wo es auf einen sehr kleinen Fixierpunkt ankommt und das Beobachtungsauge einen festen Platz hat, ist es u. U. zweckmäßig, in einem schräg gestellten kleinen Glasplättchen (Deckglas) sich eine kleine Flamme (hinter rotem Glas brennend) spiegeln zu lassen, wie in Fig. 7 angedeutet. Wenn das Objekt, auf das der Fixierpunkt projiziert wird, scharf gesehen werden soll, die Akkommodation also für den Abstand Auge—Objekt die richtige sein soll, so muß natürlich der Abstand Spiegel—Lämpchen gleich dem Abstand Spiegel—Objekt sein.

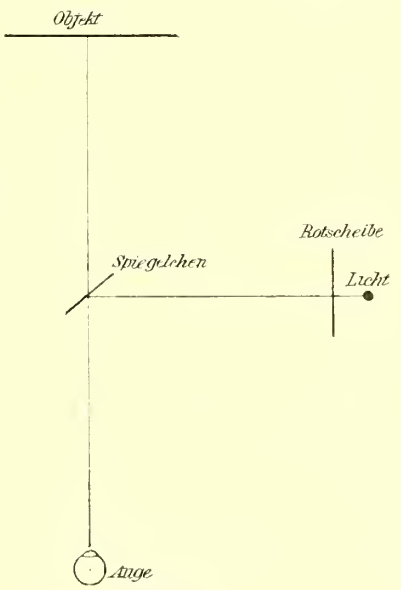


Fig. 7.

Ich habe mir eine für viele Zwecke nützliche Fixierpunktvorrichtung konstruiert, die in Fig. 8 a u. b wiedergegeben ist. Sie besteht aus einer Glühlampe in lichtdichtem Metallgehäuse, an das sich seitlich ein enges Rohr M ansetzt. Dieses enthält in seinem Endteil ein winziges total reflektierendes Prisma P, das die von der Lampe kommenden Lichtstrahlen in rechtem Winkel in ein kleines Milchglasknöpfchen K hinein reflektiert, das dem Rohr außen aufsitzt. Dieses Knöpfchen wird also von innen her durchleuchtet und bildet den einzigen Austrittsort für die Strahlen. Da das Knöpfchen halbkugelig prominiert, ist es von den verschiedensten Seiten sichtbar. Am Ansatz des Rohres an das Lampengehäuse können rote Gläser verschiedener Durchlässigkeit eingelegt werden, so daß der Fixierpunkt vom tiefsten Dunkelrot bis zu hellem Orangerot verändert werden kann. Die verschiedenen Rotgläser können zweckmäßig in einem Schieber oder Revolver (Fig. 8 a, R) vereinigt sein, so daß man die Reinheit und Helligkeit des Rotpunktes schnell ändern kann, ohne die Lampe aufzuschrauben. Sollte für irgendwelchen Zweck das Rohr, das den Fixierpunkt am Ende trägt, gebogen sein müssen, so würde man es inwendig versilbern oder einen Glasstab mit glatter totalreflektierender Oberfläche einlegen. Die ganze Lampe ist an einem Stativ allseitig beweglich angebracht.

Wenn vor einem größeren Auditorium Versuche in dunklem Zimmer gemacht werden sollen, wobei auf der weißen Wand ein heller Fixierpunkt gebraucht wird, so verwendet man zweckmäßig eine Projektionsvorrichtung einfachster Art: in einem lichtdichten Kästchen eine ev. rote Glühlampe, in der einen Wand des Kästchens eine schwache Konvex-Linse, zwischen

Linse und Lampe, nahe dem Brennpunkt der ersteren, ein feines Diaphragma, das durch die Linse in etwa 1 ½ bis 2 m Abstand vergrößert abgebildet wird.

Für manche Zwecke brauchbar ist ein blanker halbkugeliger Knopf aus Glas oder Metall, in dem sich ein nach der Seite der Beobachter hin verdecktes Licht spiegelt. Das verkleinerte virtuelle Bildchen ist dann für viele Personen gleichzeitig sichtbar.

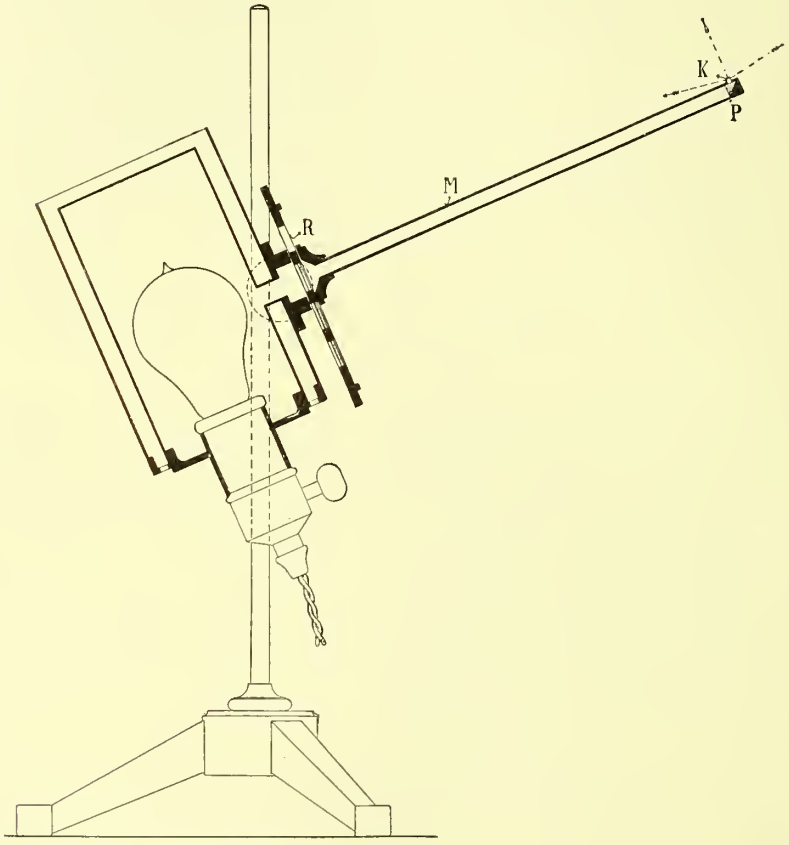


Fig. 8a.
Fixierpunkt-Vorrichtung nach Nagel, Durchschnitt.

Weniger empfehlenswert ist die Methode, rechts und links von dem zu fixierenden Punkt je ein Lichtpünktchen anzubringen und den Blick zwischen beide in die Mitte richten zu lassen. Die Fixation ist unsicherer, die Beobachtung entschieden unbequemer und keinerlei Vorteil zu nennen. Jedenfalls müssen auch diese Pünktchen rot sein und nicht etwa aus Leuchtfarbe bestehen, da man bei solchen keine Gewähr hätte, daß wirklich die foveale Fixation zwischen sie fällt (vergl. über die eigenartigen Verhältnisse der Fixation im Dämmerungssehen R. Simon, Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **36.**)

4. Besondere Apparate für Lichtsinnsmessungen.

Zur Demonstration und relativen Messung der adaptiven Empfindlichkeitszunahme bei Lichtabschluß genügen schon sehr einfache Hilfsmittel. Eine weiße Fläche von der gewünschten Größe wird im Dunkelzimmer entweder von einem im Fensterladen angebrachten Aubertschen Diaphragma oder einer Laterne beleuchtet, die ein solches Diaphragma oder eine Irisblende vor einer Milchglasscheibe trägt. Der Beobachter bewirkt Helladaptation durch längeren Aufenthalt in sehr hellem Zimmer (Balkon), tritt dann ins Dunkelzimmer und seine Lichtsinnsschwelle wird bestimmt. Die Bestimmung wird nach längerem Aufenthalt im Dunklen wiederholt. Sehr anschaulich ist der Versuch, wenn schon während der Helladaptation eines der Augen lichtdicht verbunden gehalten und damit in Dunkeladaptation versetzt wird. Die Schwellen für Hell- und Dunkelauge differieren dann enorm.

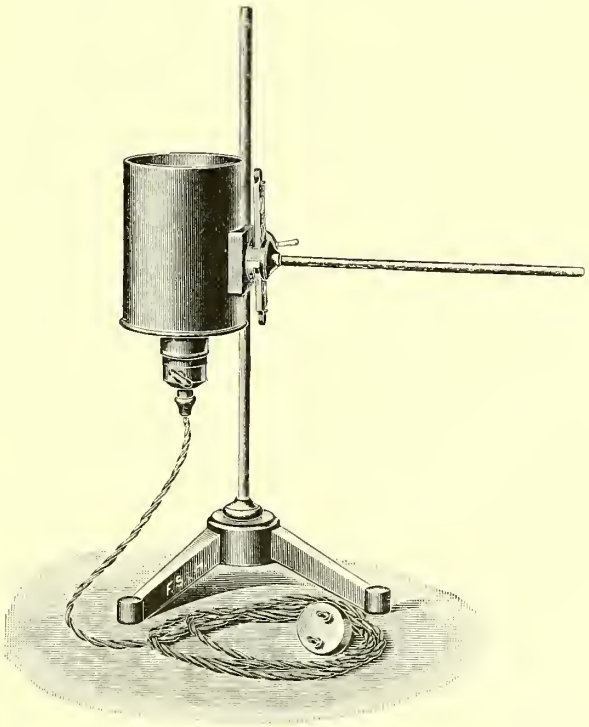


Fig. 8b.
Fixier-Vorrichtung nach Nagel.

Um den Unterschied zwischen voller Helladaptation und einstündiger Dunkeladaptation zu zeigen, braucht man freilich schon ein Quadrat-Diaphragma, das auf etwa 40 cm Seitenlänge zu erweitern, auf 1 mm zu verkleinern ist. Für die übliche Demonstration genügt ein Diaphragma von 20 cm maximaler Seitenlänge durchaus. Auch mit den größten Irisblenden von Zeiss (16 cm Durchmesser) kann man schon viel machen.

Da man im ganz dunklen Raum leicht die Orientierung verliert, das zu beobachtende Feld nicht findet und infolgedessen öfters zu hohe Schwellenwerte bestimmt, empfiehlt sich die Anbringung eines von verschiedenen Seiten her sichtbaren roten Fixier- oder Orientierungspünktchens, das die Blickrichtung bestimmt und etwa mit meiner Fixierpunktlampe (s. o.) hergestellt wird. Zweckmäßig stellt man den Schieber daran bei Beobachtung mit dem Hellauge auf das hellste Rot, bei dem Dunkelauge auf das tiefste Dunkelrot. Ist das weiße Beobachtungsfeld groß, so kann man den Fixierpunkt in die Mitte bringen, sonst darüber oder darunter in bekanntem Abstand, um dem

Blick die Richtung zu geben. Man kann auch während der Schwellenbestimmung den Punkt vorübergehend löschen, wenn man das für zweckmäßig hält.

In ophthalmologischen Werken (z. B. in Graefe-Saemischs Handbuch der Augenheilkunde, 2. Aufl. Bd. 4) ist häufig von der Bestimmung der „zentralen Lichtsinnsschwelle" die Rede. Gemeint ist dabei der Lichtsinn des Netzhautzentrums. Die dabei beschriebenen Methoden garantieren aber großenteils nicht das Sehen mit dem Netzhautzentrum. Es wäre zu wünschen, daß man auch in ophthalmologischen Kreisen sich davon überzeugte, daß der bloße gute Wille, foveal zu fixieren, nicht ausreicht, um das Netzhautbildchen auf den fovealen Bezirk zu zwingen, der seiner Umgebung an Lichtempfindlichkeit so weit nachsteht.

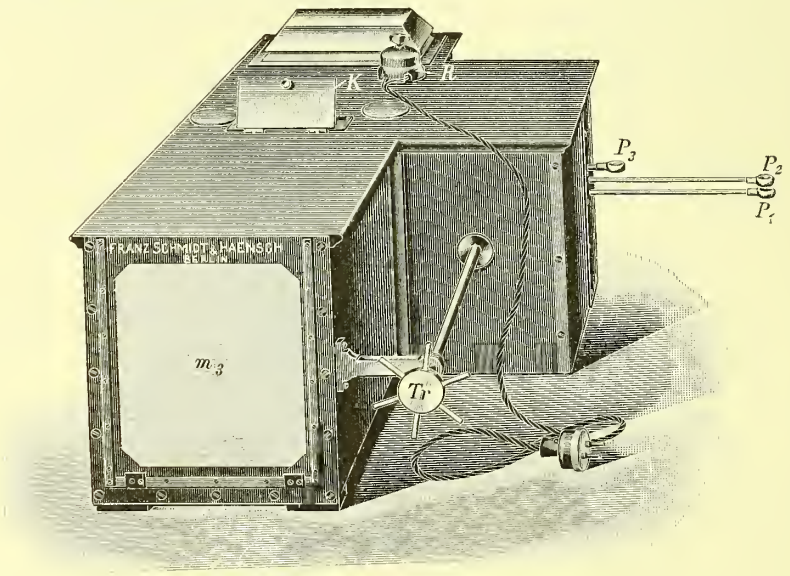


Fig. 9.
Adaptometer nach Nagel, Außenansicht.

Man kann auch das Beobachtungsfeld nebst Lichtquelle und Blende in einem Dunkelkasten anbringen, in den der Beobachter durch Löcher hineinsieht. Das kommt namentlich in Betracht, wenn man über kein tadelloses Dunkelzimmer verfügt. Eine derartige Umgestaltung der Anordnung stellt Foersters, in Ophthalmologenkreisen viel benutztes Photoptometer (zuerst Photometer genannt) dar, in dem die Quadratblende zuerst Verwendung für Lichtsinnsmessungen fand. Die Blende darin ist viel zu klein, um sowohl Schwellen bei Hell- wie Dunkeladaptation bestimmen zu können; dies ist auch nicht der Zweck des Instruments, sondern Bestimmung der Schwellen nach mäßiger Dunkeladaptation einerseits bei normalem Lichtsinn, andererseits bei Hemeralopie.

Vielseitigerer Verwendung fähig sind Apparate, wie sie Nagel[50]) und Piper[55]) angegeben haben. In diesen beiden Vorrichtungen kann die Beleuchtungsintensität eines weißen Feldes (Milchglasplatte) in bedeutendem Umfang verändert werden, bei Pipers Instrument im Verhältnis von fast

1:400000, in meinem „Adaptometer“ im Verhältnis 1:80000000 (genau meßbar etwa 1:1000000). Beide Instrumente bestehen aus länglichen lichtdicht gearbeiteten Kästen, in deren einem Ende die elektrischen Glühlampen als Lichtquelle angebracht sind, während das andere Schmalende eine Milchglasscheibe trägt, deren freie Fläche durch vorgesetzte Metallblenden beliebig verkleinert werden kann. Zwischen Lampe und Milchscheibe schiebt Piper an passenden Stellen 2 Foerster-Aubertsche Quadratblenden ein, die mit Milchglasscheiben hinterlegt sind. In meinem Adaptometer ist nur eine solche Blende enthalten (s. Fig. 10 D), dagegen können unmittelbar vor den Lampen 3 Verdunklungsscheiben $P_1 P_2 P_3$ eingeschoben werden, deren jede von dem auf sie fallenden Licht $\frac{1}{20}$ durchläßt, $\frac{19}{20}$ aber zurückhält.

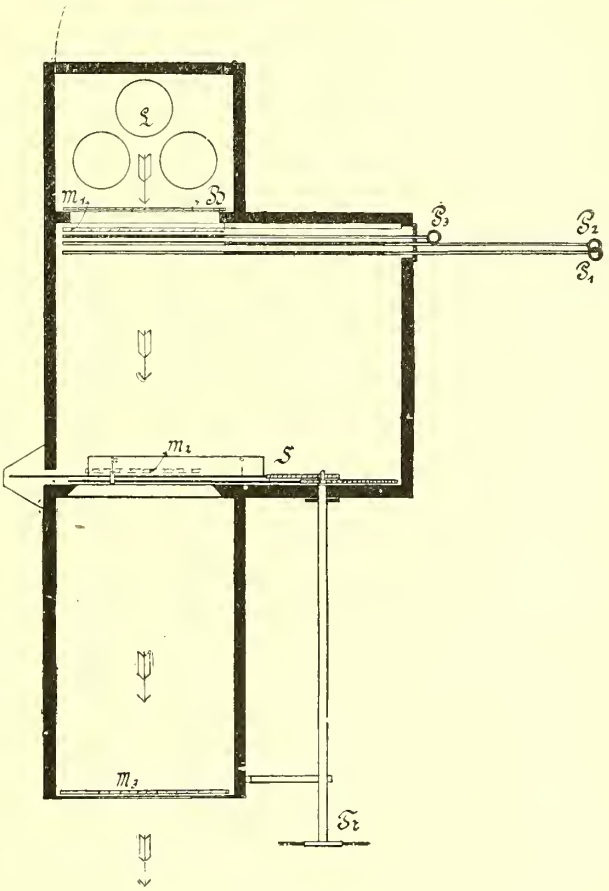


Fig. 10.
Adaptometer nach Nagel, Aufriß.

Ich habe als Einheit des Lichtsinns einen Grad der Empfindlichkeit vorgeschlagen, bei dem die vorderste Scheibe M_3 für das Auge eben noch sichtbar sich von der dunklen Umgebung abhebt, wenn

1. die freie Fläche der Scheibe durch eine kreisrunde Vorsatzblende auf einen Kreis von 10 cm Durchmesser verkleinert ist;

2. das Beobachtungsauge so weit von der Scheibe entfernt ist, daß die Kreisfläche unter dem Gesichtswinkel von 10^0 gesehen wird (57 cm Abstand, gerade bequem, um mit der Hand die Einstellvorrichtung Tr zu fassen);

3. die Beleuchtungsintensität der Scheibe M_3 gleich 1 Meterkerze ist.

Diese Empfindlichkeit 1 wird gerade erreicht, wenn die Augen voller Helladaptation (s. o. S. 17) unterzogen sind. Die Werte für andere Empfind-

lichkeitsstufen ergeben sich daraus leicht. Kann z. B. die Beleuchtungsintensität etwa auf $\frac{1}{100}$ vermindert werden (durch Einschieben einer der Verdunklungsscheiben und Verkleinerung der Quadratblendenfläche auf $\frac{1}{5}$) und wird die Fläche nun gerade noch gesehen, so ist die Empfindlichkeit $5 \times 20 = 100$ usw.

Dieser Einheitswert für Lichtreiz und Empfindlichkeit ist von der Art des benutzten Apparates unabhängig.

Periphere Netzhautteile prüft man unter Anbringung eines seitlichen dunkelroten Fixierpunktes, die Abhängigkeit der Lichtempfindlichkeit von der Größe der gereizten Netzhautfläche durch Vorsetzen von Blenden oder Veränderung des Abstandes.

Die Bestimmung der Lichtsinnsschwellen erfolgt entweder so, daß der Beobachter selbst die Intensität reguliert, bis er das Objekt eben noch sieht oder eben nicht mehr sieht, oder daß ein Gehilfe die Einstellung ändert und den Beobachter angeben läßt, ob er noch etwas sieht oder nicht. Die Ablesungen macht stets der Gehilfe, der Beobachter darf die Werte nicht vor Schluß des Versuchs erfahren. Die Einstellung erfolgt am besten so, daß man die Helligkeit zwischen bestimmt überschwelligen und unterschwelligen Werten wechseln läßt und die Ausschläge immer kleiner macht; dies wird mehrmals wiederholt. Ergeben sich dabei schwankende Werte, so kann man durch Einschiebung von Vexierversuchen, — geräuschloses Verdecken und Aufdecken des Objektes —, die Sicherheit der Angaben prüfen.

Man hat nicht zu fürchten, daß die Zwischenschiebung von überschwelligen Werten die Adaptation zerstöre, da tatsächlich kurze Einwirkung von überschwelligen Werten die Empfindlichkeit sogar vorübergehend steigert.

Man kann natürlich auch stets systematisch von untersehwelligen oder stets von übersehwelligen Reizen ausgehen, und das Eben- Sichtbarwerden oder das Eben-Verschwinden bestimmen, wobei man im letzteren Fall meistens etwas niedrigere Schwellen findet. Ohne Verwendung eines Fixierpunktes sind die Schwellenbestimmungen mit einseitiger Annäherung an die Schwellen (von oben oder von unten) wenig zuverlässig, eher schon die mit doppelseitiger Annäherung, wie beschrieben. Das gilt sowohl für den Fall, daß man den Fixierpunkt in das Beobachtungsfeld hineinlegt, um die Netzhautmitte zu untersuchen, wie auch für eine durch den Fixierpunkt bestimmte Exzentrizität.

Bei Bestimmungen der Lichtsinnsschwellen wie bei Sinnes-Schwellenbestimmungen jeder anderen Art habe ich es stets zweckmäßig gefunden, nicht lange Zeit um die Schwelle herum in kleinen Einstellungsänderungen zu suchen, bis man den endgültig besten Wert hat. Damit ermüdet man besonders ungeübte Beobachter nur und der „endgültig beste“ Wert ist schließlich ein ganz falscher. Richtiger ist es, von merklich zu hohen und zu niedrigen Werten in raschen Änderungen einen hinreichend bestimmt als Schwellenwert anzusprechenden Wert zu suchen und die größere Genauigkeit durch häufige Wiederholung des ganzen Versuchs anzustreben. Dies ist namentlich dann das gegebene Verfahren, wenn der Zustand des Sinnesorganes sich

zur Zeit des Versuchs schnell ändert, wie z. B. der Adaptationszustand des Auges in der ersten halben Stunde nach Eintritt ins Dunkle. Sehr genaue Einzel-Messungen sind erst zu erzielen, wenn der Zustand einigermaßen stationär wird, also bei peripheren Netzhautteilen etwa nach 1 Stunde; im rein fovealen Sehen dagegen ist schon nach wenigen Minuten Dunkelaufenthalt ein völlig stationärer Zustand erreicht.

Erhebliche Unregelmäßigkeiten kommen besonders leicht in die exzentrischen Schwellenwerte hinein, wenn subjektive Lichterscheinungen in Form wallender Nebel auftreten, was bei manchen Personen recht häufig geschieht, hauptsächlich bei Ermüdung. Die Schwellenwerte gehen dabei auf das doppelte und mehr in die Höhe. Abhilfe schafft am ehesten noch einiges Umhergehen. Am besten aber wird der Versuch abgebrochen. Die fovealen Schwellenbestimmungen sind von dieser Fehlerquelle fast frei, ermüden aber durch den strengen Fixationszwang noch mehr.

Um sich den Gang der Dunkeladaptation von voller Helladaptation an zu veranschaulichen, sucht man möglichst sofort nach Eintritt ins Dunkelzimmer eine Schwellenbestimmung zu machen, wofür Voraussetzung ist, daß man vorher nicht etwa den Blick auf einen sehr hellen Gegenstand gerichtet, sondern mit wanderndem Blick helladaptiert hat, um Nachbilder zu vermeiden. Macht man dann von 5 zu 5 Minuten weitere Bestimmungen, so kann man den Gang der Adaptation ohne nennenswerten Einfluß der Ermüdung bestimmen.

Im Zustand der Dunkeladaptation anzuschließende Versuche:

1. Binokular ist die Empfindlichkeit annähernd doppelt so groß wie monokular (anscheinend nicht für alle Beobachter).

2. Ein Objekt, das unter 5^0 Gesichtswinkel (extrafoveal) gesehen wird, hat eine deutlich höhere Sichtbarkeitschwelle als eines von 10^0 oder 20^0.

3. Kurze überschwellige Reize steigern vorübergehend die Empfindlichkeit. Man läßt hinter dem Rücken der Versuchsperson ein Streichholz einen Moment aufflammen.

(Bezüglich der Einzelheiten der Adaptationsversuche vergl. Literatur Nr. 1, 10, 11, 41, 43, 50, 54, 55, 63.)

Für Versuche über die zur Erregung der Netzhaut notwendigen Energiemengen vergl. Methodisches bei v. Kries[34]) für die Netzhautperipherie, bei Boswell[3]) für das rein foveale Sehen. Außerdem gilt für diese Versuche das Allgemeine über Schwellenmessungen Gesagte.

Über Schwellenbestimmungen ganz im allgemeinen vergl. G. E. Müller[49]).

5. Versuche über die Hemeralopie der Fovea.

Zu messenden Versuchen über die Hemeralopie der Fovea verwende ich das Adaptometer (s. o. S. 22), zu einfachen Demonstrationen in Kursen folgende Einrichtungen, bei deren Verwendung immer etwa 20 Min. Adaptation im dunklen oder ganz schwach beleuchteten Zimmer nötig ist.

1. Eine weiße Figur auf schwarzem Grunde, etwa der Buchstabe A, 40 cm hoch, wird im Dunkelzimmer von der mit stellbarer Blende versehenen Laterne aus schwach beleuchtet und aus 3 bis 4 m Abstand betrachtet. Direkt fixiert, sieht das A viel dunkler aus, als wenn man den Blick einen Meter

abseits richtet. Mit einiger Übung gelingt es einzelne Teile des Buchstabens verschwinden zu lassen, wenn man den Blick schnell darauf lenkt.

2. Anordnung von fünf weißen Punkten ⁘ von der gleichen Lampe beleuchtet (Breite der ganzen Figur 40—50cm). Schon bei geringer Übung gelingt es den jeweils fixierten Punkt verschwinden zu lassen, während die übrigen hell erscheinen.

3. Weiße Kreisfläche von 6cm Durchmesser auf schwarzem Grund, am besten Vorderwand eines lichtdichten Kastens, der eine Glühlampe enthält. Das Zentrum des Kreises ist durchstochen und mit Rotscheibe und Milchglas (oder rotem Papier) hinterlegt. Zunächst wird die innere Lampe gelöscht, das weiße Feld von außen beleuchtet, Beobachtung aus 2—4m Abstand. Um bei einer für periphere Sichtbarkeit genügenden Beleuchtung den Kreis foveal verschwinden zu lassen, bedarf es schon einiger Übung, die meisten Beobachter stellen unwillkürlich parazentrale Stellen ein. Allen wird die Beobachtung leicht, wenn man den dunkelroten Punkt in der Mitte aufleuchten läßt. Man sieht bei Fixation dieses Punktes die eben noch untermerkliche Beleuchtung für den Kreis. Bei exzentrischer Betrachtung leuchtet der Kreis hell auf. Der Versuch eignet sich auch zur Anstellung ungefährer Empfindlichkeitsmessungen.

6. Unterschiedsschwellen des Lichtsinns.

Zur Bestimmung der Unterschiedsempfindlichkeit für Helligkeiten eignen sich fast alle Photometer, bei denen für Gleichfarbigkeit der Vergleichsfelder gesorgt ist. Am zweckmäßigsten ist die Verwendung des Lummer-Brodhunschen Würfels[68]), der in sehr verschiedenen Formen konstruiert wird. Das Prinzip veranschaulicht nebenstehende einfachste Form. (Fig. 11.) Die beiden rechtwinkligen Glas-Prismen ABD und BCD sind mit ihren Hypotenusenflächen aufeinander gekittet. Die Hälfte der Fläche (DE) ist versilbert. Hinter dem Würfel steht die

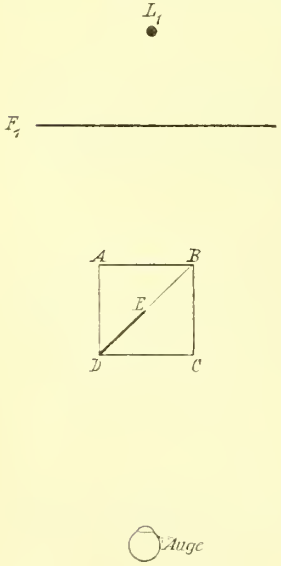


Fig. 11.
Lummer-Brodhunscher Würfel, schematisch.

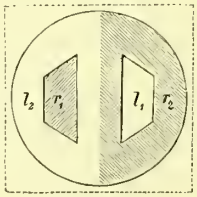


Fig. 12.
Gesichtsfeld des Kontrastphotometers nach Lummer-Brodhun.

Lichtquelle L, die eine Fläche F_1 (z. B. Milchglas) gleichmäßig erleuchtet, seitlich ebenso L_2 und F_2. Der Beobachter bei O sieht die Hälfte DE von

F_2 aus erhellt, EB von F_1 aus. Bei gleicher Beleuchtung von F_1 und F_2 verschwindet die Trennungslinie bei E.

Von den mannigfachen Abänderungen sei erwähnt die ebenfalls von Lummer und Brodhun herrührende Herstellung eines Kontrastphotometers, dessen Würfelfläche für das beobachtende Auge so aussieht, wie es Fig. 12 darstellt. Durch mehrfache Spiegelung wird bewirkt, daß die schraffierten Teile des Feldes von der einen, die nichtschraffierten von der anderen Lichtquelle aus erleuchtet sind und sich durch Kontrast beeinflussen. Fig. 13 zeigt den Strahlengang; der weiße Schirm S ist von den 2 zu vergleichenden Lichtquellen von je einer Seite bestrahlt.

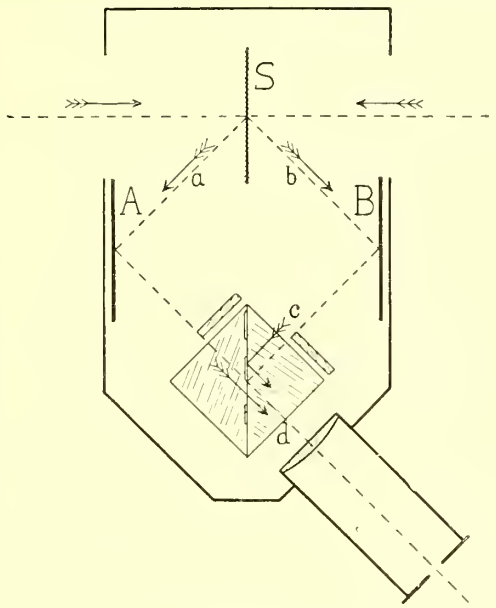


Fig. 13.
Kontrastphotometer nach Lummer-Brodhun, schematisch.

Zweckmäßig sind auch die Diffusionsphotometer (Joly[66]) Elster[67]), die Fig. 14 veranschaulicht. AB ist eine undurchsichtige, beiderseits spiegelnde Platte, auf deren beiden Seiten parallelopipedische Stücke einer trüben durchscheinenden Masse M_1 und M_2, wie Paraffin, Alabaster und dergl. aufgelegt sind. Die Lichtquellen L_1 und L_2 durchleuchten die durchscheinenden Platten und der auf die Kante AB blickende Beschauer beurteilt, ob die ihm zugewandten Seiten von M_1 und M_2 helligkeitsgleich sind.

Es ist zu unterscheiden zwischen der Unterschiedsempfindlichkeit in der Fovea centralis, derjenigen der Netzhautperipherie und beider Regionen zusammen. Die beschriebenen Photometer gestatten leicht, die Feldgröße auf Foveagröße (1^0 bis $1{,}5^0$) zu beschränken oder auch sehr viel größer zu machen. Eventuell vergrößert man das Bild durch ein Linsensystem. Zur Prüfung der Peripherie mit Ausschaltung der Foveapartie wäre ein zentrales Feld von entsprechender Größe auf dem Würfel oder dem Diffusionsphotometer durch eine undurchsichtige Fläche zu verdecken, in deren Mitte eventuell ein Fixierpunkt anzubringen wäre.

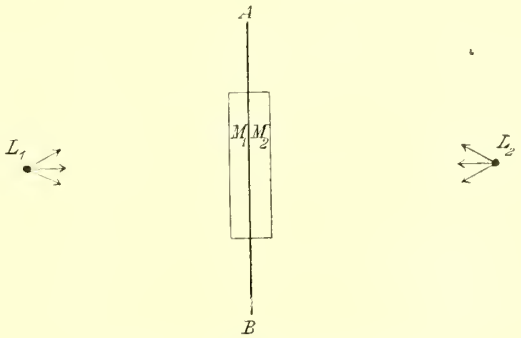


Fig. 14.
Diffusionsphotometer, schematisch.

Für viele Fälle sehr zweckmäßig ist die von Hering angegebene Methode des verschwindenden Fleckes. Hierbei wird das eine der zu vergleichenden Lichter auf kleinerem Feld geboten, umgeben von einem großen Feld, das vom anderen Licht erleuchtet ist. Besonders vollkommen ist dies wieder mit dem Lummer-Brodhunschen Würfel zu erzielen, indem statt der Fläche DE in Fig. 11 nur ein kleines Stück bei E versilbert wird. Für andere Zwecke genügt es auch, einfach in einer Fläche AD (Fig. 15) bei BC ein Loch auszustanzen, durch welches das bei O befindliche Auge hindurch auf eine Fläche EF sieht. Wird die Beleuchtungsintensität von AD und EF gleich groß gemacht, so verschwindet der Fleck nahezu.

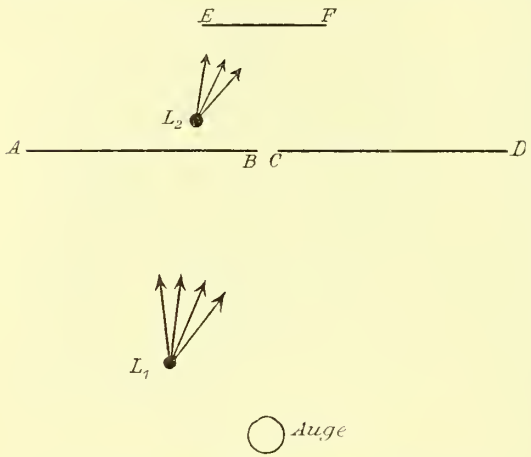


Fig. 15.
Zu Herings Methode des verschwindenden Fleckes.

Es ist technisch nicht leicht, den Rand bei BC so zu erhalten, daß er nicht als Ring sich markiert. Hat die Platte AD eine merkliche Dicke und fällt das Licht etwas schief auf sie, etwa von L her, so erscheint der Rand bei B dunkler, bei C heller als die Fläche. Es ist daher zweckmäßig, AD sehr dünn zu nehmen (dünnstes Kupferblech) oder den Rand BC zuzuschärfen, außerdem die Beleuchtung möglichst genau aus der Richtung von O her oder wenigstens von allen Seiten gleichmäßig auffallen zu lassen.

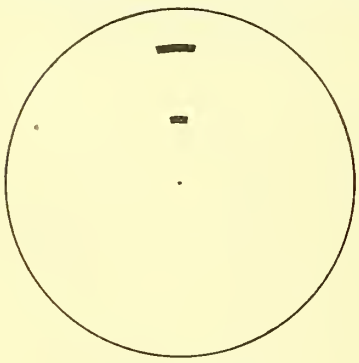


Fig. 16.
Massonsche Scheibe.

Am nützlichsten ist die Fleckmethode bei Untersuchung der Netzhautperipherie oder mindestens extramakularer Teile, wobei ein seitlich von BC gelegener Teil fixiert wird, oder der Blick in bestimmtem Abstand um BC herumwandert. Es fällt dann das Bild des Fleckes wie seiner unmittelbaren Umgebung auf extramakulare, unter sich gleichartige Netzhautteile. Fixiert man dagegen den Fleck, so fällt sein Bild in die Fovea, das seiner Umgebung dagegen in extrafoveale, bei großen Flächen auch in extramakulare Regionen, was unter Umständen Komplikationen bewirken kann.

Massonsche Scheiben. Über die Messung der Unterschiedsempfindlichkeit mit Massonschen Scheiben ist hier wenig zu sagen. Die Scheiben tragen bekanntlich auf weißem Grunde einen kleinen Sektor, der aus einem schwarzen Ring geschnitten ist. Die Begrenzung des Ringstückes muß

natürlich von radiärer Richtung, nicht parallel, sein. Nach Donders' Vorgang kann man auf einer Scheibe konzentrisch mehrere Stücke von steigender Winkelgröße anbringen (Fig. 16), um das häufige Wechseln der Scheiben zu vermeiden. Man bestimmt dann, welcher der Ringe eben noch gesehen wird.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit muß sehr groß sein, mindestens 30 Umdrehungen pro Sekunde.

Zu berücksichtigen ist, daß die Angaben zweier Personen oder einer Person zu verschiedenen Zeiten nur vergleichbar sind, wenn die Beleuchtung der Scheibe dieselbe Intensität und Richtung hat und die Beschauer aus dem gleichen Abstand, in gleicher Richtung, in gleichem Adaptationszustand auf die Scheibe blicken. Am besten ist künstliche Beleuchtung.

Will man den Unterschied zwischen Weiß und Schwarz möglichst groß haben, so verwendet man Barytpapier (dessen Barytfläche nicht mit den Fingern berührt werden darf und auch sonst sehr empfindlich ist). Die Ringstücke werden mit scharfem Messer ausgeschnitten und die rotierende Scheibe, von Auer- oder Nernstlicht bestrahlt, vor die Öffnung an der Schmalseite eines langen, innen geschwärzten Kastens gesetzt, um tiefes Schwarz zu erhalten.

Über andere Einflüsse auf die Versuche vgl. R. Simon[61]).

IV. Versuche über den zeitlichen Verlauf der Reizung des Sehorgans.

1. Versuche über die Einwirkung kurzdauernder Lichtreize.*)

Um die eigenartigen von Purkinje entdeckten, später von Bidwell, v. Kries, Hess u. a. genauer studierten Nachbilderscheinungen nach kurzer Lichtreizung zu beobachten, kommen 2 Methoden in Betracht: das Aufblitzenlassen eines unbewegten Lichtes und das Vorbeibewegen eines dauernd sichtbaren Lichtes im Gesichtsfeld. Über die Methodik der Beobachtungen der ersteren Art, die große Schwierigkeiten bieten und viel Übung verlangen, ist wenig zu sagen. Für Einzelreize ist ein Momentverschluß nach Art der in der Photographie verwendeten das bequemste Hilfsmittel sowohl zur Erzeugung engbegrenzter, etwa fovealer Reize, wie auch zur Momentanerhellung des ganzen Gesichtsfeldes; für letzteren Zweck wird der Verschluß dicht vor dem Auge angebracht. Blickt man dabei gegen ein großes helles Objekt (Fenster) und läßt dieses einen Bruchteil einer Sekunde sichtbar werden, so beobachtet man erstens sehr deutlich die doppelschlägige Erregung, indem das helle Fenster mit wenig deutlichen Einzelheiten zweimal aufblitzt, und sieht dann nach einer Pause von einer bis einigen Sekunden (bei immer dunkelgehaltenen Augen) das tertiäre, gewöhnliche positive Nachbild mit überraschend viel Detail sich entwickeln, und unter Farbenwechsel geraume Zeit bestehen, um so länger und deutlicher, je heller das Fenster war. Es ist einer der anschaulichsten Versuche zur Demonstration der Nachbilder, freilich immer nur für den einzelnen, da man bei objektiver Projektion auf eine Wand nicht leicht die nötige Intensität erreicht.

Das Purkinjesche sekundäre Bild (Bidwells „ghost") und die zwischen ihm und dem primären liegende tief dunkle Phase sieht man am

*) Literatur Nr. 4, 11, 18, 25—29, 35—39, 56.

besten bei bewegter Lichtquelle, wobei also das Nachbild neben dem primären Bild gesehen wird, da dieses in dem etwa $^1/_5$ Sekunde dauernden Zeitintervall schon auf eine andere Netzhautstelle gewandert ist.

Zum genaueren Studium empfiehlt sich die nach Angaben von v. Kries hergestellte und von Samojloff[56]) beschriebene Vorrichtung des Freiburger physiologischen Instituts, die durch die Figuren 17 u. 18 veranschaulicht wird. Ein großer Schwarzblechkasten enthält 3 Auerlampen (ich verwende einen Kranz von elektrischen Glühlampen, die einzeln eingeschaltet werden können, um die Helligkeit zu regulieren). In einem runden Ausschnitt der Vorderwand ist die gußeiserne Scheibe S, durch Motorkraft drehbar, lichtdicht eingesetzt. Auf ein in ihr ausgespartes Loch O kann der Deckel D aufgesetzt werden, der zum Aufdrücken von verschiedenen Matt-, Milch- und Farbengläsern sowie Blenden dient. Am Kreisbogen B kann das Fixierzeichen Z verschoben und so gestellt werden, daß das Bild des Feldes A durch den Fixierpunkt hindurch läuft. Ich verwende statt des runden Loches zur Demonstration

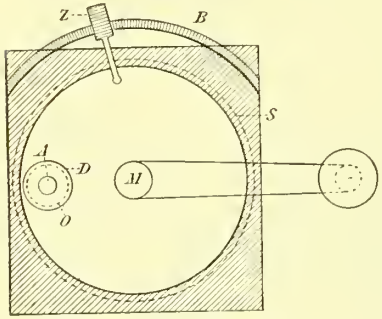


Fig. 17.
Apparat zur Demonstration des Purkinjeschen Nachbildes nach v. Kries u. Samojloff. Vorderansicht.

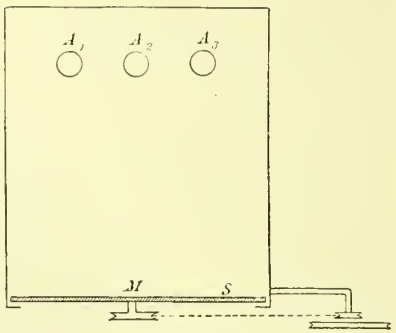


Fig. 18.
Derselbe Apparat, Aufriß.

einen etwa 15 cm langen, 2—6 mm breiten radiären Schlitz, der durch Gläser bedeckt wird. Hiermit kann man die pfeilschenförmige Abbiegung des sekundären Bildes beim Fixieren des Mittelpunktes M sehr schön zeigen.

Um ein deutliches sekundäres Bild zu bekommen, muß die Intensität des Lichtes richtig gewählt sein. Allgemeine Angaben hierüber lassen sich nicht machen, da das Optimum individuell verschieden ist und mit dem Adaptationszustand wechselt. Am besten und reinsten erhält man das sekundäre Bild, wenn man nach mäßiger Helladaptation wenige Minuten im Dunkelzimmer geweilt hat. Nach längerem Dunkelaufenthalt wird das primäre Bild breit und verwaschen und verschmilzt dann mit dem sekundären. Schließlich kommt ein Adaptationszustand, bei dem das sekundäre Bild bei keiner Helligkeitsstufe mehr sichtbar zu machen ist.

Will man zeigen, daß das Nachbild dem primären komplementär gefärbt ist, so verwendet man stark blau oder orangegelb gefärbte Gläser, große Helligkeit und kurzen Dunkelaufenthalt. Aus unbekannten Gründen sind aber die Nachbilder nicht immer komplementär gefärbt zu erhalten, sondern alle bläulich.

Naeh langwelligem Rot (ohne Orange) entsteht unter keinen Umständen ein Purkinjesches Naehbild (wohl aber bei Orangerot). Dagegen ist ein Versuch mit Rot sehr anschaulieh, um zu zeigen, daß auch wenigstens die kürzerwelligen Teile des Rot noch Dämmerungswert haben, d. h. auf die farbenblinden Stäbehen einwirken, und zwar später als auf die farbenempfindenden Zapfen. Nach 10 bis 15 Minuten Dunkelaufenthalt schließt sich nämlich an das Rot ein immer breiter werdender leuchtend bläulichweißer Saum an.

Auch mit spektral zerlegtem Licht können die Versuche gemacht werden. Vergl. darüber Bidwell und v. Kries.

Um die von Charpentier beschriebenen und von Mc Dougall genauer untersuchten Erscheinungen einer wiederholt zwischen Dunkel und hell oszillierenden Empfindung zu veransehaulichen, läßt man das leuchtende Objekt bei großer Helligkeit sehnell rotieren, am besten einen radiären Schlitz wie oben beschrieben, mit rotem Glas oder Papier bedeckt. Es entsteht dann eine fächerartige Figur, die einen Quadranten des Kreises und mehr ausfüllt und dunkle radiäre Streifung zeigt.

Um den Ausfall des Purkinjesehen Nachbildes in der Fovea zu zeigen, verwendet man ein kleines, am besten blaues oder gelbes Primärbild und einen Fixierpunkt.

Die meisten beschriebenen Versuche kann man aueh, etwas weniger bequem, aber mit einfacheren Mitteln anstellen, wenn man nach dem Vorgang von Hess geradfädige Glühlampen verwendet (ca. 25 em lang), die in einer Metallhülse eingeschlossen sind, die einen einige Millimeter breiten Längsschlitz trägt. Der Schlitz ist mit durchscheinendem Papier, etwa orangegelbem hinterlegt. Die Röhre wird mit der Hand bewegt, während der Blick fixiert gehalten wird, der Röhre also nicht folgen darf.

Vor großem Auditorium zeigt man das Purkinjesche Naehbild am besten folgendermaßen. Im dunklen Saale projiziert man, wie oben S. 19 angegeben, einen mäßig hellen Fixierpunkt auf eine weiße Wand, auf dieselbe dann noch mittels einer Projektionsbogenlampe einen blauen vertikalen Streifen; in den Schieber des Projektionsapparates sehiebe ich dazu ein kräftig blaues Glas ein, das bis auf einen vertikalen Streifen mit schwarzem Papier beklebt ist. Die Abbildung wird so eingerichtet, daß der etwa 50 cm lange und 4 cm breite blaue Streifen mit seiner Mitte in die Höhe des Fixierpunktes fällt. Bewegt man nun die Blauscheibe mit ihrem Schlitz horizontal hin und her und läßt den hellen Fleck fixieren, so zeigt sich ein anfangs bläuliches, später deutlich gelbes Nachbild, das dem blauen Bild nachwandert, um bei der Umkehr der Bewegung scheinbar in das blaue Bild hineinzuschlüpfen und auf der anderen Seite wieder zum Vorschein zu kommen. Der Saal wird am besten erst unmittelbar vor dem Versuch verdunkelt, wenn er nicht vorher sehr hell erleuchtet war.

In diesem Zusammenhang verdient noch ein sehr interessanter Versuch Erwähnung, der unter dem Namen der „flatternden Herzen“ durch v. Szily bekannt wurde, und auf dem trägeren Funktionieren des Dämmerungsapparates gegenüber dem Tagesapparat im Auge (v. Kries) beruht. Am besten zeigt man ihn in folgender Form. Auf einem tief blutroten oder dunkel kirschroten Stück Papier oder Pappe von einigen Quadratdezimetern

Größe ist ein etwa zehnpfennig- bis markstückgroßes kreisförmiges Papierstück von gesättigter blauer Farbe (bei hellem Lampenlicht etwas dunkler als der rote Grund) aufgeklebt. Nachdem man sich gut dunkeladaptiert hat, nimmt man dieses Pappblatt in die Hand und beleuchtet es ziemlich stark (im Dunkelzimmer), etwa mit einer hellen Petroleumlampe aus 2 m, mit einer Auerlampe aus 4 bis 5 m Entfernung, und bewegt dann die Hand oszillierend hin und her. Man hat täuschend den Eindruck, daß der blaue Kreis auf dem roten Grunde um etwa 1 cm hin- und herschlottert, wobei ein heller Saum hinter ihm auftritt. Mit rotem Kreis auf blauem Grund gelingt der Versuch weit schlechter. Ist der Beobachter gut helladaptiert und tritt schnell ins Dunkelzimmer, so sieht er die erwähnte Erscheinung bei keiner noch so großen oder kleinen Beleuchtungsintensität. Dunkeladaptation ist also Hauptbedingung. Farbenpaare von wenig verschiedenem Dämmerungswert zeigen die Erscheinung nicht. Eine der beiden Farben muß immer Rot sein.

Fast noch überraschender ist folgende Versuchsform: In ein Kartonstück schneidet man einen Schlitz von etwa 6—10 cm Länge und 5 mm Breite, und hinterlegt ihn zur Hälfte der Länge mit dunkelblauem, zur anderen Hälfte mit rotem Glas. Nun erzeugt man im Dunkelzimmer eine helle Fläche von einigen Quadratdezimetern (Kasten, dessen eine Seite aus Milchglas besteht, innen Glühlampe) und bewegt den Schlitz vor der Fläche hin und her, nach vorgängiger guter Dunkeladaptation. Die blaue Hälfte des Schlitzes schwankt dabei anscheinend lose herum, der roten Hälfte nachhinkend.

2. Versuche über intermittierende Lichtreize.

Die Mehrzahl der Versuche über intermittierende Lichtreize wird mittels des Kreisels ausgeführt, der überhaupt in der physiologischen Optik eine bedeutsame Rolle gespielt hat und noch immer spielt, trotzdem er in manchen Gebieten von noch leistungsfähigeren Apparaten abgelöst worden ist. Bezüglich des Allgemeinen über den „Farbenkreisel“, wie er meistens genannt wird, verweise ich auf den betreffenden Abschnitt unten S. 64.

Für viele Lichtsinnversuche besonders wichtig ist gleichmäßiger Gang und konstante Rotationsgeschwindigkeit, die bekanntlich der wundeste Punkt des Kreiselverfahrens ist.

Am besten und für ziemlich langsame, dabei gleichmäßige Rotation eigentlich noch unersetzlich ist ein gutes Uhrwerk. Für größere Geschwindigkeiten, 20 und mehr Umdrehungen in der Sekunde reichen allenfalls Elektromotoren aus, deren Eigenrotation natürlich schneller sein und durch Übersetzungen vermindert werden muß. Am meisten erreicht man noch mit selbstregulierenden Schwachstrommotoren, während an einen Zentralen-Strom angeschlossene Motoren immer bedenklich bleiben. Die Regulierung auch der Schwachstrommotoren geschieht doch in einem Hin- und Herozillieren um eine Mittelgeschwindigkeit. Meistens schadet das nichts, in anderen Fällen aber sehr viel. Jedenfalls müßte bei den jetzt vorliegenden Konstruktionen immer noch geprüft werden, ob sie die für den speziellen Fall erforderliche Gleichmäßigkeit der Rotation liefern.

Selbstverständlich ist, daß man in den Fällen, in denen eine bestimmte Geschwindigkeit möglichst konstant erhalten werden soll, die Kreiselscheibe zweckmäßigerweise mit einer schweren Schwungscheibe auf die gleiche Achse setzt, während man letztere wegläßt, wenn willkürlich schnelle Änderungen der Geschwindigkeit beabsichtigt werden.

Sehr befriedigende Konstanz der Rotationsgeschwindigkeit von der größten bis zu ganz kleiner (8—10 Umdrehungen in der Sekunde) liefert ein Apparat, den ich von Fr. Schmidt und Haensch in Berlin habe herstellen lassen, freilich zunächst zu ganz anderem Zwecke, als dem hier erwähnten. Der Apparat ist bestimmt, als Laryngostroboskop ein Lichtstrahlenbüschel rhythmisch zu unterbrechen, indem eine radiär geschlitzte Aluminiumscheibe vor einer Nernstlampe rotiert. Statt der Aluminiumscheibe können beliebige Kreiselscheiben aufgeschoben werden. Ein Elektromotor bewirkt die Rotation, u. zw. wird er von dem vollen Zentralen-Strom mit 110 Volt Spannung gespeist. Die Regulierung der Geschwindigkeit geschieht durch eine elektrische Foucault-Bremse, bestehend aus einer dicken Aluminiumscheibe, die in dem Felde eines starken Elektromagneten rotiert. Die Intensität dieses Feldes wird durch Änderung des Widerstandes in dem Stromkreis des Elektromagneten in feiner Abstufung bewirkt. Selbst bei ansehnlichen Schwankungen der Netzspannung bleibt die Rotation konstant, weil die Spannungsänderung auf Motor und Bremse gleichzeitig, aber in entgegengesetztem Sinne wirkt.

Die jeweilige Umdrehungsgeschwindigkeit bestimmt man am genauesten auf akustischem Wege, indem man aus der Scheibe kleine Löcher ausschlägt und sie als Sirene anbläst, wozu der Apparat schon eingerichtet ist.

Über die Herstellung der Kreiselscheiben für die verschiedenen Zwecke, zur Demonstration des Talbotschen Satzes, zu den von Schenck, Samojloff, Benham, Bidwell u. a. beschriebenen interessanten Versuchen ist wenig Allgemeines zu sagen. Wo es sich um Herstellung kleinerer schwarzer Flächen auf weißem Grunde handelt, pflege ich Tusche anzuwenden, bei größeren Flächen, die gleichmäßig und möglichst tief schwarz sein sollen, schneide ich die Stücke aus schwarzem Wollpapier oder Tuchpapier, wie es u. a. bei Herrn Zimmermann, Leipzig, zu erhalten ist. Da auch dieses Papier, wie auch jedes weiße, das Licht nicht ganz gleichmäßig zerstreut, muß man sich bei manchen Versuchen an der stillstehenden Scheibe überzeugen, ob auch die Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung günstig ist. Bei Flimmerversuchen ist äußerste Exaktheit in der Herstellung der Scheiben nötig, da kleine Fehler in der Zeichnung, wie auch in der Gleichmäßigkeit der Lichtreflexion eine falsche, nicht in Rechnung gezogene Periodik in die Erscheinung hineinbringen können. Auf derartige Fehler hat Schenck[59]) aufmerksam gemacht.

Will man die Verschmelzungsfrequenz an einer Scheibe mit schwarzen und weißen Sektoren genau bestimmen, so ist zu berücksichtigen, daß Zentrum und Peripherie der Netzhaut sich hierin selbst im helladaptierten Zustand ungleich verhalten, ferner daß Augenbewegungen selbst kleinsten Betrages Fehler bedingen. Man betrachte also den Kreisel entweder aus mindestens 2 bis 5 m Entfernung oder stelle ein Diaphragma davor (Kartonscheibe mit Loch, der Karton nicht erheblich dunkler oder heller beleuchtet als die Flimmerscheibe!), das einen etwa fovealen Bezirk ausschneidet. Auch Fixierpunkt (schwarzer Faden mit Knoten) ist für genaue Versuche zweckmäßig.

Die auf den Versuchen von Schaternikoff[58]) beruhende Demonstration der trägeren Reaktion des Dämmerungsapparates gegenüber dem Tages-

apparat im Auge läßt sich in folgender Weise ausführen. Man läßt 2 Kreiselscheiben mit gleicher Geschwindigkeit rotieren, von denen die eine 2 schwarze, 2 weiße Quadranten, die andere 4 schwarze, 4 weiße Oktanten trägt, oder (noch einfacher) man richtet eine Scheibe so her, daß sie in ihrem inneren Teil die Vierteilung, im äußeren die Achtteilung trägt. Fig. 19 zeigt eine hierzu geeignete Scheibe. Die Umdrehung besorgt ein Elektromotor, dessen Geschwindigkeit so reguliert wird, daß bei Beleuchtung der Scheibe mit einer hellen Glüh- oder Auerlampe die 4teilige Scheibe noch deutlich flimmert, die 8teilige eben nicht mehr oder nur eben merklich.

Versetzt man nun das eine Auge in Dunkeladaptation, indem man es 20—30 Minuten lichtdicht verschließt, und betrachtet bei gleicher Beleuchtung mit diesem die Scheiben, so sieht man mit diesem Auge, wenn man es zu kurzer Beobachtung öffnet, beide Scheiben in gleichmäßig ruhigem Grau.

Natürlich erscheint die Scheibe für das adaptierte Auge viel heller als für das andere. Der Versuch ist einwandsfreier, wenn man 2 Lichtquellen anwendet, deren Intensität so abgepaßt ist, daß die Kreiselscheibe mit der einen (schwachen) beleuchtet, dem Dunkelauge ebenso hell aussieht, wie dem Hellauge bei Beleuchtung mit der anderen (stärkeren) Lichtquelle. Um diese Vergleichung zu ermöglichen, müssen die Lampen schnell nacheinander einzuschalten sein und die hellere muß durch ein geeignetes blaues Glas auf gleiche Farbe mit der Farbe des Dämmerungssehens im Dunkelauge gebracht werden. Auch bei dieser Versuchsanordnung ist es leicht zu sehen, wie viel langsamer die Intermission des Lichtes für das Dunkelauge sein darf, um Verschmelzung zu erlauben.

Fig. 19.

Ich finde den Unterschied wesentlich größer als Schaternikoff, indem ich für das Hellauge eine mindestens 4mal größere Intermittenzzahl brauche wie für das Dunkelauge bei subjektiv gleicher Helligkeit.

Andere Methoden zur Beobachtung bei periodischer Lichtreizung gibt es noch in großer Zahl. Man kann die beobachtete Fläche stillstehen und die Beleuchtung intermittieren lassen.

Hierzu kommen Vorrichtungen in Betracht ähnlich den zur Stroboskopie benutzten. Man kann z. B. das reelle Bild eines Nernststäbchens auf einer rotierenden, mit schmalen radiären Schlitzen versehenen Scheibe abbilden, wodurch eine scharf unterbrochene Beleuchtung erzielt wird, wie bei meinem oben erwähnten Laryngostroboskop.

Zu genauer quantitativer Regulierung des Lichtes eignet sich dieses Verfahren weniger als zu weitgehender und feiner Regulierung der Intermittenzzahl, insbesondere also zur Stroboskopie.

Auf dem Prinzip der von Rood eingeführten Flimmerphotometrie beruht eine ganze Anzahl neuerer Photometer-Konstruktionen, speziell zur Helligkeitsvergleichung ungleichfarbiger Lichter. Sowohl in dieser Verwendungsweise wie auch zu anderen Zwecken können Instrumente der ge-

nannten Art im physiologisch-optischen Laboratorium von großem Nutzen sein. Ich erwähne ein neues erprobtes Instrument dieser Art, das Flimmerphotometer von Fr. Schmidt und Haensch. Seine Konstruktion ist aus Fig. 20 ersichtlich. Ein Gipskeil G wird von beiden Seiten her von den zu vergleichenden Lichtern bestrahlt (J_1 J_2). Zwei Linsen L_1 und L_2 bilden diese beleuchteten Flächen in der Ebene des Okularloches A ab. In den Strahlengang ist ein Glaskeil K eingeschaltet, der durch den Elektromotor M in rasche Rotation um die Achse des Instrumentes versetzt wird und bewirkt, daß das Loch bei A abwechselnd von dem Lichte der einen und der anderen Gipsfläche aus erleuchtet wird. Wenn die Rotationsgeschwindigkeit nicht unter ein bestimmtes Minimum sinkt, gelingt es, für das bei A beobachtende Auge das Flimmern der beiden intermittierenden Lichter zum Verschwinden zu bringen, sobald die Lichtintensitäten J_1 und J_2 gleich groß sind. Die Intensitätsregulierung erfolgt am einfachsten so, daß die beiden Lichtquellen jederseits feststehen und das Photometer auf einer Laufschiene mit Schlitten verschoben wird, bis das Flimmern aufhört. Vergl. Bechstein[2]), Boltunow[6]) und v. Maltzew[45]).

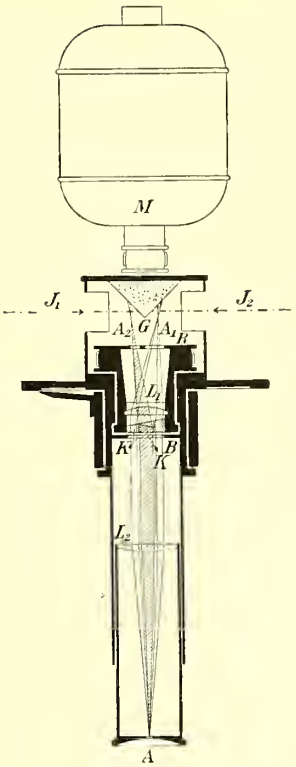


Fig. 20.

3. Versuche über das Abklingen der Erregung nach längerer Reizung, positive und negative Nachbilder.

Die Methodik der Nachbildversuche ist abgesehen von den oben besprochenen Nachbildern nach kurzdauernder Lichtreizung im allgemeinen so einfach und bekannt, daß hier wenig darüber zu sagen ist und eigentlich nur einige Demonstrationsversuche der Erwähnung bedürfen. In der Hauptsache ist auf die von Helmholtz, Aubert und Hering angegebenen Methoden zu verweisen.

In Kursen veranschauliche ich das notwendigste über Nachbilder, indem ich 10 bis 20 Sekunden lang die Mitte einer vertikalen Lichtlinie (geradfädige Glühlampe) fixieren lasse und dann nach Löschung der Lichtlinie den Raum mäßig erhellt lasse. Man beobachtet die Latenzzeit bis zum Auftreten des Nachbildes, den Wechsel zwischen positiv und negativ, wie er spontan und beim abwechselnden Blick auf hellen und dunklen Grund auftritt, den Farbenwechsel, die Gestalt des Nachbildes (in der Mitte, im fovealen Bezirk, scharfbegrenztes schmales Nachbild, an den Enden der Linie keulenförmige Anschwellung), Umsäumung des Bildes mit komplementär gefärbter Linie und diffusem Hof, Wirkung der Augenbewegungen und des Blinzelns. Dieselben Versuche benutze ich, um die projizierte Raddrehung und die kompensatorischen Rollungen bei Seitwärtsneigung des Kopfes zu zeigen

(letzterer Versuch wird messend gemacht). Endlich wird am Nachbild einer gewöhnlichen Glühlampe mit gebogenem Faden demonstriert, daß das Nachbild auf eine beliebige dem Auge gebotene Ebene projiziert wird, winzig klein sich auf einem nahe gehaltenen Blatt Papier darstellt, riesig groß an ferner Wand.

V. Versuche über Größe des Gesichtsfeldes und über Skotome.

Zur Bestimmung der äußeren Gesichtsfeldgrenzen*) bedient man sich der ophthalmiatrischen Methodik, d. h. der verschiedenen für die Zwecke der Praxis angegebenen Perimeter, die für die ungefähre Bestimmung der Grenzen für das Sehen weißer Objekte hinreichend genau arbeiten, freilich nicht die äußersten Grenzen der Lichtperzeption scharf ergeben können. Hierzu muß im Dunkelzimmer und mit Dunkeladaptation gearbeitet werden, unter Fixation eines kleinen roten Lichtpunktes und mit peripherer Annäherung ziemlich lichtschwacher Objekte auf einem Perimeterbogen.

Bezüglich der Farbengrenzen im Gesichtsfeld gibt die ophthalmiatrische Methodik Ergebnisse, die diagnostisch wertvoll sind, physiologischen Wertes aber großenteils entbehren, da die Farben physikalisch unbestimmt sind, und die Art und Weise ihrer Anwendung einen willkürlich herausgegriffenen und nicht hinlänglich klar definierten Spezialfall der Bedingungen darstellt, die für das Farbensehen in der Netzhautperipherie maßgebend sind. Vergl. hierüber unten S. 88 u. 89.

Von den Skotomen interessiert physiologisch am meisten der Mariottesche blinde Fleck, dessen Feststellung ja bekannt und leicht ist. Abgesehen von der Demonstration mittels fertiger Karten, auf denen ein Fixierpunkt und ein größerer schwarzer Fleek in passendem Abstand gedruckt sind, empfiehlt sich als m. E. für den Unterricht weit anschaulicher das Verfahren der Projektion des blinden Fleckes auf eine schwarze Tafel, auf der die nach dem Perimeterverfahren bestimmten Grenzen des Fleckes aufgezeichnet werden.

Die Versuchsperson sitzt vor einer schwarzen Wandtafel, in etwa $1\,^1/_2$ m Abstand, das Kinn auf einer geeigneten Stütze. Besonders zweckmäßig sind die von Augenärzten benutzten Kopfstützen, bei denen sich noch eine kleine Stütze gegen den unteren Orbitalrand legt, um den Kopf still zu stellen, oder auch solche Kopfhalter, an die zugleich die Stirn angelehnt wird, und bei denen eine lose hängende Bleehplatte vor das nicht beobaehtende Auge geschoben werden kann. In Ermangelung einer solchen muß dies Auge durch eine Klappe geschlossen werden. Als Fixierpunkt dient ein weißer Fleck auf der Tafel, als Objekt ein weißes kreisförmiges Papierstück von 3—8 mm Durchmesser an schwarzem Stiel; das Objekt wird der Gegend des blinden Fleckes auf der Tafel in leicht oszillierenden Bewegungen genähert und der Ort, wo es eben verschwindet, durch einen Kreidepunkt markiert. Ich lasse mehrere Beobachter nacheinander unter gleichen Bedingungen ihren blinden Fleck aufnehmen, um die individuellen Unterschiede der Lage des

*) Vergl. hierzu Gräfe-Sämischs Handbuch der ges. Augenheilkunde. IV. Bd., 1. Abteil. Abschnitt VIII von Landolt und Hummelsheim. Ferner: K. Baas, Das Gesichtsfeld. Stuttgart 1896.

Fleckes festzustellen (eventuell Hinweis auf die besonderen Verhältnisse bei Ametropien). Für jede Person nehmen wir eine andere Farbe der Kreide. Schon mit Objekten der angegebenen Größe markieren sich zuweilen bei gut beobachtenden Personen die Anfangsstücke der Retinagefäße, besser bei kleinem Objekt (3mm auf $1\frac{1}{2}$m Abstand), wo man unter Umständen die Gefäßstämme auf beträchtliche Strecken verfolgen kann, wenn die Fixation sicher ist.

Ich lasse dann, wenn der für die meisten Personen gemeinsame Bezirk des blinden Fleckes durch die verschiedenfarbigen Linien zum Ausdruck gekommen ist, nochmals den Fixierpunkt fixieren und eine Kerzenflamme in dem Skotombezirk hin und her bewegen. Der Beobachter sieht die Flamme selbst nicht, dagegen den diffusen Lichtschein, der von Reflexion des Lichtes von der Papille auf die Nachbarteile der Netzhaut herrührt.

Während von der Aufsuchung pathologischer Skotome hier abzusehen ist, dürfte es nicht überflüssig sein, mit einigen Worten auf die Versuche einzugehen, bei Totalfarbenblinden (Achromaten) ein der Fovea entsprechendes Skotom nachzuweisen. Theoretisch ist dieses, wenn überhaupt, dann etwa in der Größe des stäbchenfreien Bezirkes zu erwarten, also wenig über 1^0; der Gesichtswinkel von 1^0 auf 1m Entfernung projiziert, entspricht der linearen Dimension von 17,5mm, auf Leseweite etwa 5—6mm. Da die Achromaten bei der Tendenz zu fixieren stets mehr oder weniger starken Nystagmus haben, und sichere Fixation Vorbedingung für die Auffindung eines kleinen Skotoms ist, liegt es auf der Hand, daß der Nachweis eines so kleinen Skotoms nur unter besonders günstigen Umständen gelingen kann.

Mit dem gewöhnlichen Perimeter-Verfahren gelingt es nur, wenn das Skotom wesentlich größer als 1^0 ist, wie in einem von mir untersuchten Fall. Uhthoff[65]) kam in einigen Fällen zum Ziel, indem er ein ringförmiges „Fixierzeichen“ verwendete. Das ist deshalb sehr zweckmäßig, weil schon beim Normalen die im Dämmerungssehen zum „Fixieren“ foveal unterschwelliger Lichtpunkte benutzte Netzhautstelle individuell verschieden ist, wie König[32]) fand. Beim Totalfarbenblinden hat man daher a priori keinen Anhaltspunkt dafür, welchen parafovealen Teil er zum genauesten Sehen verwenden wird. Der Nystagmus zeigt, daß eine solche Prädilektionsstelle in der Regel gar nicht vorhanden ist. Bietet man nun dem Auge eine ringförmige Figur von überfovealem Umfang, so ist die Wahrscheinlichkeit vorhanden, daß bei dem Bestreben, die ganze Ringfigur zu sehen, die blinde Stelle ungefähr auf die Mitte des Ringes eingestellt wird.

Ein Muster von vielen äquidistanten hellen Punkten auf dunklem Grunde, von dem Hess[30]) erwartete, daß es zur Entdeckung eines zentralen Skotoms, wo ein solches vorhanden wäre, verwendbar sein müßte, erscheint für diesen Zweck nicht geeignet, weil damit tatsächlich selbst das große Skotom des blinden Fleckes von vielen nicht konstatiert werden kann (Heine[19]) Nagel). Auch wenn man ein Muster von Lichtpunkten ($\frac{1}{2}$cm große Punkte, 1cm voneinander abstehend, in horizontalen und vertikalen Reihen geordnet) so schwach erleuchtet, daß sie für ein gut dunkeladaptiertes Auge foveal eben unterschwellig, extrafoveal aber recht hell sind, bemerken die wenigsten normalen Personen das relative zentrale Skotom, das für sie unter diesen Bedingungen des Sehens tatsächlich besteht; von der überwiegenden

Mehrzahl wird der Ausfall eines oder einiger der Fovea entsprechenden Punkte sogar nicht erkannt, wenn darauf aufmerksam gemacht wurde, während dieselben Personen, wie oben erwähnt, bei einem Muster aus nur 5 Punkten den Ausfall leicht konstatieren. Es wird eben in dem kleinen fovealen Bezirk das vielpunktige Muster ergänzt, wie ein Tapetenmuster im blinden Fleck. Bei nur momentaner Beliehtung ist es selbst für Geübte schwer, das relative zentrale Skotom zu bemerken. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß für das normale Auge die Bedingungen des reinen Dämmerungssehens immerhin verhältnismäßig ungewohnte sind, die im gewöhnlichen Leben nur ausnahmsweise, oder nur an einem kleinen Bruchteil des Tages eintreten, während die Totalfarbenblinden, die eine funktionsunfähige Fovea haben, dauernd unter diesen Bedingungen sehen, also zur unwillkürlichen Ausfüllung dieses Gesichtsfelddefektes besonders disponiert sein müssen. Darum kann man nicht sicher erwarten, mit dem Punktmuster ein Skotom zu finden, wenn es nicht frisch entstanden ist.

VI. Versuche über inadäquate Netzhautreizung.

Für die hier in Betracht kommenden Versuche kann von einer speziell ausgebildeten Methodik nur in beschränktem Sinne gesprochen werden. Über die galvanische Reizung des Auges liegen sorgfältige Versuche von G. E. Müller*) vor, an deren Methodik ich mich bei ähnlichen Versuchen auch angeschlossen habe. Um festen Sitz der Elektrode nahe dem Auge zu erreichen, bedient man sich einer sog. Paukbrille oder einer Automobilbrille, die fest am Kopfe anschließt. Innen, da wo die Brille dem Gesicht anliegt, befestigt man ein etwa bohnengroßes Stück Badeschwamm oder Watte, mit schwacher Kochsalzlösung getränkt, in dem der Zuleitungsdraht befestigt ist; das Schwammstück wird, je nach dem gewünschten Reizort, über, unter oder neben dem Auge angebracht. Leicht läßt sich die Anordnung dabei so treffen, daß das Auge offen bleibt und auf helle oder dunkle Flächen gerichtet werden kann; eben so leicht kann man natürlich auch das Auge dabei passiv geschlossen halten. Die andere Elektrode wird meistens in großer Fläche am Nacken angelegt, kann aber auch an Brust oder Arm angebracht werden. Die Hauptsache ist, daß sie in großer Fläche fest anliegt. Für die Elektrode am Auge ist zu beachten, daß auch sie möglichst fest anliegen muß, damit die Stromdichte an den Berührungsstellen mit der Haut nicht zu groß ist. Wenn nämlich eine etwas starre Schwammelektrode die Haut nur an einzelnen Punkten berührt, machen selbst mäßige Ströme ein so heftiges Brennen, daß die Beobachtungssicherheit leidet. Weicher, gut durchtränkter Schwamm oder Watte ist also zu empfehlen, die Brille oder Binde mit der Elektrode muß festsitzen und etwa 10 Minuten vor dem Versuch angelegt sein, damit auch die Epidermis gut durchtränkt ist.

Bei dem großen Widerstand, der in der Haut immer gegeben ist, haben große Plattenpaare in der Batterie gar keinen Zweck, ganz kleine Elemente oder Akkumulatoren leisten ebensoviel. Die meisten in Betracht kommenden Beobachtungen wird man mit 4 bis 8 Volt Spannung machen können. Um

*) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorgane, **14**, 1897, 329—374.

besonders bei höheren Spannungen die lästigen Schließungs- und Öffnungsreize möglichst zu beseitigen, verwendet man nicht metallische Kontakte, sondern am besten Flüssigkeitswiderstände. Ich bediene mich dazu des „Kompressionsrheostaten“ von Blasius und Schweizer[79]), der aus einem etwa 10cm langen Stück Gummischlauch, mit konz. Zinksulfatlösung gefüllt besteht, in dessen durch Korke geschlossene Enden jederseits ein amalgamierter Zinkstift eingeführt ist. Zwischen den beiden Stiften bleibt etwa 2cm Zwischenraum; an der Stelle dieses Zwischenraums kann der Schlauch durch eine Schraube mehr oder weniger komprimiert werden, so daß ein Einschleichen in den Strom möglich ist.

Literatur zu Abschnitt A: Methoden zur Erforschung des Lichtsinns*).

1) H. Aubert, Physiologie der Netzhaut, Breslau 1865.

2) W. Bechstein, Flimmerphotometer mit zwei in der Phase verschobenen Flimmerphänomenen. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. 1906. S. 249.

3) F. P. Boswell, Über die zur Erregung des Sehorgans in der Fovea erforderliche Energiemenge. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, 299, 1908.

4) Bidwell, On the recurrent images following visual impressions. Proc. Roy. Soc. 1894.

5) Boehm, Marie, Über physiologische Methoden zur Prüfung der Zusammensetzung gemischten Lichtes. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, (3) 1907.

6) A. Boltunow, Über die Sehschärfe im farbigen Licht. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, 359. 1908.

7) E. P. Braunstein, Beitrag zur Lehre des intermittierenden Lichtreizes etc. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **33**, 1903.

8) A. Charpentier, Description d'un photoptomètre differentiel. Arch. d'Opht. II, 418, 1882 u. IV. 307, 1884.

9) — Perception des différences de clarté. Arch. d'Opht. IV. 400, 1884.

10) — Expériences sur la marche de l'adaptation rétinienne. Archives d'Ophtalm. **6**, 1887.

11) Mc Dougall, British Journ. of Psychol. I, 78, 1904.

12) E. Dürr, Über das Ansteigen der Netzhauterregungen. Wundt, Philosoph. Studien **18**, 1902.

13) H. Erdmann, Die Spektren der Edelgase, in: Lehrbuch der anorganischen Chemie. Braunschweig (Vieweg), 1900.

14) S. Exner, Über die zu einer Gesichtswahrnehmung nötige Zeit. Sitz.-Ber. K. Akad. Wissensch. VIII, Wien 1868.

15) N. Finsen u. A. Reyn, Ein neuer Lichtsammelapparat etc. Mitteil. Finsens Mediciniske Lysinstitut. 4. Heft. 1903.

*) Da eine auch nur annähernde Vollständigkeit der Literaturangaben über alle Arbeiten, in denen Versuche zur Licht- und Farbensinnsphysiologie beschrieben werden, hier ausgeschlossen ist, habe ich überwiegend nur die neuere Literatur zitiert, die in bekannten Handbüchern und allbekannten Publikationen enthaltenen Mitteilungen von Helmholtz, Hering usw. dagegen nicht erwähnt. Auch im Texte sind die bekannten klassischen Versuche, besonders auch diejenigen, die keine besonderen Apparat-Zurichtungen voraussetzen, nicht oder nur flüchtig erwähnt, um den etwas umständlicheren und weniger bekannten Versuchen etwas mehr Raum gönnen zu können. N.

16) R. Förster, Über Hemeralopie und die Anwendung eines Photometers etc. Breslau 1857.

17) R. Golant, Über das Licht der Nernstlampen und seine Verwendung zu physiologisch-optischen Zwecken. Zeitschrift f. Sinnesphysiologie **43**, 1908.

18) Hamaker, Over Nabeelden. Utrecht 1899; u. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **21**, 1.

19) L. Heine, Über das zentrale Skotom bei der kongenitalen Amblyopie. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLIII, 12, 1905.

20) H. v. Helmholtz, Handbuch der physiologischen Optik. 1. Aufl. 1867. 2. Aufl. 1896.

21) E. Hering, Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. Gräfe-Sämischs Handbuch der Augenheilkunde II. Aufl. I. Teil XII. Kap. 1905—1907.

22) — Zur Lehre vom Lichtsinn. 2. bis 6. Mitteilung. Sitz.-Ber. K. Akad. Wissensch. Wien, 1873—74.

23) — Eine Methode zur Beobachtung des Simultankontrastes. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **47**, 236, 1890.

24) — Beitrag zur Lehre vom Simultankontrast. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **1**, 18, 1890.

25) C. Hess, Experimentelle Untersuchungen über die Nachbilder bewegter leuchtender Punkte. Arch. f. Ophthalm. XLIV.

26) — Zur Kenntnis des Ablaufs der Erregung im Sehorgan. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **27**, 1.

27) — Untersuchungen über das Abklingen der Erregung im Sehorgan. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **95**. 1903.

28) — Bemerkung zur Lehre von den Nachbildern etc. Arch. f. Augenheilkunde 44, S. 245.

29) — Über den Ablauf des Erregungsvorgangs nach kurzdauernder Reizung etc. Arch. f. Ophthalm. LI. 1900.

30) — Weitere Untersuchungen über totale Farbenblindheit. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **29**, 99, 1902.

31) E. Hummelsheim, Photometrie und Photoptometrie (Lichtmessung und Untersuchung des Lichtsinns). Gräfe-Sämischs Handbuch der ges. Augenheilkunde II. Aufl. IV. Bd. 1. Abteilg. S. 327—389.

32) A. König, Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. Sitz.-Ber. Berl. Akad. Wissensch. 1894.

33) Köttgen, Else, Untersuchung der spektralen Zusammensetzung verschiedener Lichtquellen. Annal. d. Physik u. Chemie. N. F. 52, 1894, 793.

34) J. v. Kries, Über die zur Erregung des Sehorgans nötigen Energiemengen. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **41**, 373, 1906.

35) — Über die Funktion der Netzhautstäbchen. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **9**, 113.

36) — Über die Wirkung kurzdauernder Lichtreize auf das Sehorgan. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **12**.

37) — Kritische Bemerkungen zur Farbentheorie. Ebenda **19**.

38) — Über die im Netzhautzentrum fehlende Nachbilderscheinung etc. Ebenda **29**, 81.

39) — Über die absolute Empfindlichkeit der verschiedenen Netzhautteile im dunkeladaptierten Auge. Ebenda **15**, 327.

40) — Über die Wahrnehmung des Flimmerns durch normale und durch total farbenblinde Personen. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **32**, 1903.

41) W. Lohmann, Über Helladaptation. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **41**, 290, 1906.

42) O. Lummer, Die Ziele der Leuchttechnik. Elektrotechnische Zeitschr. **23**, 1902.

43) — Experimentelles über das Sehen im Dunklen und Hellen etc. Versamml. Deutsch. physik. Gesellsch. VI. 2. 1904.

44) O. Lummer u. E. Brodhun, Vergleichung der deutschen und der Hefnerlampe mittels Glühlichtes. Zeitschr. f. Instrumentenkunde. **10**, 119—133, 1898.

45) C. v. Maltzew, Über individuelle Verschiedenheit der Helligkeitsverteilung im Spektrum. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **43**, 1908.

46) G. Martius, Über die Dauer der Lichtempfindungen. Beiträge zur Psychologie I, 3, 1902.

47) — Das Gesetz des Helligkeitswertes der negativen Nachbilder. Beiträge zur Psychologie I, 1, 1896.

48) A. Masson, Études de photométrie électrique. Ann. de Chim. et de Phys. (3). 14. 1845.

49) G. E. Müller, Die Gesichtspunkte und die Tatsachen der psychophysischen Methodik. Ergebnisse der Physiologie II, (2), 297—516. 1903.

50) W. A., Nagel, Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung. Adaptometer und kleines Spektralphotometer (Anomaloskop). Zeitschr. f. Augenheilk. XVII. 1907.

51) A. Pertz, Photometrische Untersuchungen über die Schwellenwerte der Lichtreize. Dissert. Freiburg i. Br. 1896.

52) K. Petrén, Über die Beziehungen zwischen der Adaptation und der Abhängigkeit der relativen Unterschiedsempfindlichkeit von der absoluten Intensität. Skandin. Arch. f. Physiol. **15.** 1903.

53) A. Pflüger, Farbenempfindlichkeit des Auges. Wiedemanns Annalen, IV, F. **9,** 1. 1902.

54) H. Piper, Über Dunkeladaptation. Zeitschr. f. Psychologie und Sinnesphysiologie. **31,** 1903, S. 161.

55) — Zur messenden Untersuchung und zur Theorie der Hell-Dunkeladaptation. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLV, (NF. III) 1907.

56) A. Samojloff, Zur Kenntnis der nachlaufenden Bilder. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **20,** 118.

57) — Einige Beobachtungen über intermittierende Netzhautreizung. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **85,** 1901.

58) M. Schaternikoff, Über den Einfluß der Adaptation auf die Erscheinung des Flimmerns. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **29,** 1902, 241.

59) F. Schenck, Über intermittierende Netzhautreizung. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **64; 68; 77; 90.**

60) O. Schirmer, Über die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes für den Lichtsinn. Arch. f. Ophthalm. XXXVI. 121, 1890.

61) R. Simon, Über Wahrnehmung von Helligkeitsunterschieden. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **21,** 433, 1899.

62) H. Snellen u. E. Landolt, Photoptometrie. Gräfe-Sämischs Handbuch der ges. Augenheilkunde, I. Aufl. Bd. III. 1. 1874.

63) Treitel, Über das Verhalten der normalen Adaptation. Arch. f. Ophthalmologie. 1887.

64) A. Tschermak, Über spektrometrische Verwendung von Helium. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **88,** 95, 1901.

65) W. Uhthoff, Ein Beitrag zur kongenital totalen Farbenblindheit. Zeitschr. f. Psychol. u. Sinnesphysiol. **20,** 326, 1899, u. **27,** 344, 1902.

66) J. Joly, On a diffusion-photometer. Philos. Mag. (5) **22,** 26. 1888.

67) S. Elster, Vergleichungskörper für Lichtmessungen. Zeitschr. f. Instrumentenk. VIII, 299, 1888.

68) O. Lummer u. Brodhun, Ersatz des Photometerfleckes durch eine rein optische Vorrichtung. Ebenda. IX. 23, 1889.

69) K. Baas, Das Gesichtsfeld. Stuttgart (Enke). 1896.

70) E. Blasius u. F. Schweizer, Über Elektrotropismus und verwandte Erscheinungen. Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol. **53,** 493.

B. Methoden zur Erforschung des Farbensinnes.

I. Die Gewinnung farbigen, insbesondere monochromatischen Lichtes.

Dreierlei Methoden stehen zur Gewinnung farbigen Lichtes als hauptsächlichste zur Verfügung:

1. Farbige Lichtquellen.
2. Strahlenfilter.
3. Spektrale Zerlegung gemischten Lichtes.

Für ganz beschränkte Zwecke kommt noch die Entstehung von Farben in polarisiertem Licht in Betracht, die hier unberücksichtigt bleibt.

1. Farbige Flammen.

Diese haben in der physiologischen Optik geringe Bedeutung, da man farbiges Licht, wie es die bengalischen Flammen liefern, besser und bequemer durch Kombination einer weißen Lichtquelle mit Strahlenfiltern herstellt. Eine größere Bedeutung kommt dagegen der Natriumflamme zu, die für manche Zwecke hinreichend reines Licht liefert; so hat Kühne sie mit Nutzen angewandt, wenn er purpurhaltige Netzhäute präparieren wollte. Der Umstand, daß das Blut im Natriumlicht schwarz wie Tinte aussieht, bietet den Vorteil, daß man Verunreinigungen der Netzhäute und der Lösungen mit Blut leichter vermeiden kann, als im roten Laternenlicht, wo Blut nicht von trübem Wasser zu unterscheiden ist.

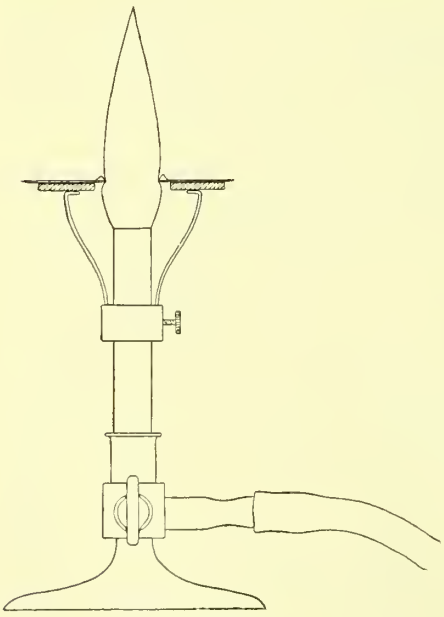


Fig. 21.
Brenner für Natriumlicht.
Aus Ostwald-Luther, Hand- und Hilfsbuch.)

Man bringt das Natriumsalz in die Flamme des Bunsenbrenners oder einer Spirituslampe mit Hilfe eines hohlen Winterschen Platinringes oder eines Körbchens aus Platindraht. Sehr praktisch ist auch die in Fig. 21 dargestellte Vorrichtung, bei der ein Ring aus etwas ausgefranstem Asbestpapier mit dem Salz (am besten Natriumnitrat) bestreut wird. Das Papier liegt auf einem stärkeren Asbestring (Reed, vergl. Lit. [60]).

Wünscht man stärkere Intensitäten des Natriumlichtes, so verwendet man nach Fleischls Vorschlag das leichtflüchtige Bromnatrium, das freilich unangenehme Bromdämpfe entwickelt, wie auch das Natriumchlorat, das für kurze Zeit sehr helle Flammen gibt. Man kann auch nach Du Bois [18]) Stifte aus Natriumbikarbonat, Natriumbromid und Traganthgummi, 40 mm

stark, im Knallgasgebläse erhitzen. Sie müssen nachgeschoben werden, da sie schnell verdampfen.

Helle Flammen erhält man ferner durch Zerstäubung der Flüssigkeit in der Nähe der Flammen (Beckmann[5]). Dies ist namentlich bei Lithium zu empfehlen.

Soll das Natriumlicht ganz frei gemaeht werden von den Strahlen, die die blaue Gasflamme aussendet, so kann man sie noch nach dem Vorsehlage von Lippich reinigen durch Vorsetzen eines Gelbfilters.

Die Verwendung der grünen Thalliumflamme, die ebenfalls sehr rein ist, muß wegen der giftigen Dämpfe beschränkt bleiben. Zur Eichung von Spektralapparaten eignen sieh natürlich alle die oben S. 6 angegebenen farbigen Lichtquellen mit Linienspektrum.

2. Strahlenfilter.

Sie zerfallen in

farbige Gläser,
andere feste, durehsiehtige oder durchscheinende Platten,
farbige Flüssigkeiten.

Welehe von diesen Absorbentien verwendet werden können, hängt ganz von der Art der Versuehsanordnung ab. Man kann folgende allgemeine Gesiehtspunkte hervorheben.

a. Allgemeines. Wo Konstanz der Liehtqualität über längere Zeit, Tage, Wochen und mehr, aueh unter der Einwirkung von Licht, Luft und Wärme, verlangt wird, sind hauptsächlich die Gläser am Platze, die farbigen Papier-, Gelatine-, Gelatoid- und Celluloidplatten aber ausgeschlossen. Von farbigen Flüssigkeiten sind die aus organischen Farbstoffen gebildeten meines Wissens ebenfalls größtenteils ausgeschlossen (namentlich die Anilinfarben), nur unter gewissen besonders günstigen Bedingungen (kurze, schwache Belichtung, kühle Temperatur, Luftabschluß) ist ein Teil von ihnen einige Tage bis einige Monate lang verwendbar. Unter den anorganischen Farbstoffen sind solche, die in Lösung unter geeigneten Umständen noch wesentlich länger als konstant gelten können (z. B. manche Kupferlösungen, Nickellösungen).

Wo es auf Gewinnung eines möglichst homogenen Lichtes bei möglichst großer Lichtstärke ankommt, sind die flüssigen Filter den Gläsern im allgemeinen überlegen, und selbst mit gefärbten Gelatineblättehen erreicht man in dieser Hinsicht zuweilen mehr als mit Gläsern, freilich nur mit den schnell verblassenden Anilinfarben.

Möglichst dünne Schicht und möglichste Leichtigkeit sind die Vorteile der Gelatineblätter, die sich also zur Anbringung auf Kreiselscheiben und dergleiehen eignen.

Wenn möglichste Gleichmäßigkeit der Färbung und Lichtdurchlässigkeit des Filters auf größeren Flächen (mehr als ein paar Quadratzentimeter) notwendig ist, so können im allgemeinen nur flüssige Filter in gut parallelwandigen Gefäßen in Betracht kommen. Unter Farbengläsern und auf Glas gegossenen Gelatineschichten findet man bei sorgfältiger

Wahl ab und zu Stücke von einem Quadratdezimeter Größe, die hinreichend gleichmäßig sind.

Ein wirklich homogenes Licht, d. h. Licht von nur einerlei Wellenlänge, gibt natürlich kein Lichtfilter, und die Verwendung von Filtern überhaupt setzt immer voraus, daß man eine geringere Reinheit des Lichtes, als sie beim spektralen Verfahren erzielbar ist, in Kauf nimmt, zugunsten gewisser Bequemlichkeiten und Vereinfachungen.

Am unbedenklichsten kann man einen recht breiten Spektralbezirk noch als „einfarbig" rechnen, wenn er aus der roten „Endstrecke" des Spektrums geschnitten ist. Wenn z. B. ein rotes Glas die Strahlen vom äußersten sichtbaren Rot bis herunter zur Wellenlänge 650 $\mu\mu$ durchläßt, so sieht das durchgelassene Lichtgemisch (im fovealen Sehen!) völlig gleichfarbig und sättigungsgleich aus, wie ein beliebiges homogenes Licht von einer Wellenlänge >650 $\mu\mu$ gleicher subjektiver Helligkeit. Es ist indessen zu berücksichtigen, daß dieses gleiche Aussehen für den Tagesapparat des Auges nicht ausschließt, daß in anderer Hinsicht jenes Lichtgemisch und jenes homogene Licht ungleich wirken können, und zwar auch für unseren Gesichtssinn. Bekanntlich hat das Rot mit einer Wellenlänge <670 $\mu\mu$ eine zwar sehr geringe, aber immerhin nachweisbare Dämmerungsvalenz, d. h. einen Reizwert für den farbenblinden Dämmerungsapparat des Auges. Wenn daher ein homogenes Licht von der Wellenlänge 690 und ein Gemisch, das alle Wellenlängen von 650 $\mu\mu$ aufwärts enthält, foveal gleich hell gemacht werden, so hört die Gleichheit auf, sobald die Farbenfelder mit extrafovealen Netzhautpartien im Zustand der Dunkeladaptation betrachtet werden, in dem man doch im Dunkelzimmer zumeist arbeitet. Das Gemisch wird hier heller und weniger gesättigt.

Für andere Farben als Rot gilt noch in viel höherem Maße der Satz, daß 2 Lichter, die foveal gleichfarbig aussehen, aber physikalisch ungleiche Lichtgemische darstellen, bei Betrachtung mit größeren Netzhautteilen auch subjektiv ungleich werden können.

Zur Prüfung der Filterwirkung eines farbigen Mediums bedient man sich, wenn es nur auf eine ungefähre Übersicht der Absorptionswirkung ankommt, entweder eines sogenannten objektiven Spektrums, das mittels Bogenlampe auf einen weißen Schirm projiziert wird, oder eines gewöhnlichen Spektralapparates, in dem man das ganze Spektrum als „subjektives" sieht (etwa das bequeme kleine geradsichtige Taschenspektroskop nach Art des Browningschen) und bringt das Absorbens zwischen Lichtquelle und Spalt.

Man kann dabei die Unreinheit des Filters leicht überschätzen, auf Grund folgender Erscheinung. Projiziert man ein Spektrum und schaltet beispielsweise ein grünes Glas ein, so sieht man auf dem Schirm das grüne Spektralgebiet begrenzt durch einen orangefarbenen bis roten Streifen. Nimmt man das Glas weg, so sieht man, daß dieser rote Streifen an einer Stelle des Schirmes lag, wo im vollen Spektrum durchaus nicht Rot, sondern Gelbgrün liegt. Dies beruht aber in der Hauptsache nicht auf Unreinheit des Filters, sondern auf Mängeln der Projektionsvorrichtung, besonders auf unerwünschten Reflexionen im Innern des Prismas (am stärksten bei gerad-

siehtigen Flüssigkeitsprismen). Bei Untersuchung desselben Absorbens im subjektiven Spektrum erscheint es daher auch stets reiner als bei objektiver Darstellung des Absorptionsspektrums, weil das projizierte Spektrum eben meistens selbst schon unrein ist.

Exaktere Bestimmung der Filterwirkung wird mittels des Spektralphotometers ausgeführt, welches in vielen verschiedenartigen Konstruktionen angegeben worden ist. Besonders zuverlässig und bequem ist das von Fr. Schmidt und Haensch ausgeführte Instrument nach A. Königs Angaben[38]), bezw. dessen von Martens[51], [52]) angegebene Modifikation. Auf die Einzelheiten der Konstruktion kann hier nicht eingegangen werden, es sei nur folgendes erwähnt.

Im Gesichtsfeld des Okulars sind 2 quadratische, dicht aneinanderstoßende Felder sichtbar, die beide mit demselben homogenen Licht erleuchtet sind, dessen Wellenlänge beliebig gewählt werden kann. Ein doppelbrechendes Wollastonsches Prisma im Strahlengang bewirkt, daß die beiden Felder von senkrecht aufeinander polarisierten Lichtern erhellt sind. Vor dem Okularspalt ist ein Nicolsches Prisma drehbar angebracht, dessen Drehung das Helligkeitsverhältnis der beiden Felder in leicht meßbarer Weise ändert.

Die Absorption eines Glases für ein bestimmtes homogenes Licht wird nun so gemessen, daß man das zu prüfende Glas in den Strahlengang für eines der beiden Vergleichsfelder bringt. Durch Drehung des Nicol wird die Helligkeit beider Felder wieder gleich gemacht und aus der Nicolstellung berechnet, um wieviel die Intensität des von der Absorption frei gebliebenen Lichtes verringert werden mußte, um die Helligkeitsgleichheit mit dem durch die Absorption geschwächten Licht wieder herzustellen.

Führt man solche Bestimmungen für eine größere Zahl von homogenen Lichtern verschiedener Wellenlänge durch, so erhält man eine zweckmäßig in Kurvenform darstellbare Übersicht über die Filterwirkung des geprüften Glases.

Andere Formen von Spektralphotometern sind von Lummer und Brodhun[45]), von Brace u. a. angegeben worden. Für kleine farbige Objekte, sowohl feste wie flüssige Filter, ist Engelmanns Mikrospektralphotometer[21], [69]) äußerst bequem, das von Zeiss sowohl mit Dispersionsprisma wie mit Thorpschem Gitter geliefert wird. Zur Eintragung der Absorptionsbestimmungen sind sehr zu empfehlen die „Tafeln und Tabellen zur Darstellung der Ergebnisse spektroskopischer und spektrophotometrischer Beobachtungen", herausgegeben von Th. W. Engelmann, Leipzig (W. Engelmann) 1897.

b. Farbengläser. Trotz der zum Teil außerordentlich leuchtenden Farben lassen doch die meisten Gläser mehrerlei Farben durch, z. B. die blauen entweder Blau und Violett, oder Blau und Grün, oder alle drei Farben und meistens auch Rot; ebenso lassen die goldgelben außer Gelb reichlich Rot, Orange und Grün durch. Nur die roten Gläser sind leicht in solcher Beschaffenheit zu erhalten, daß sie ausschließlich Rot durchlassen. Sie sind dann freilich stets schon recht dunkel. Hellere Gläser lassen reichlich Orange, manche auch noch Gelb und Grüngelb in nicht zu vernachlässigender

Menge durch. Die meisten Rotgläser sind als sogenannte Überfanggläser hergestellt, d. h. mit einer dünnen Schicht kupferhaltigen Glases beiderseits überzogen. Man stellt solche Überzüge auch auf blauem Kobaltglas her. Da dieses Glas in Orangegelb und Gelbgrün stark absorbiert, ergibt seine Kombination mit rotem Überfang ein bei gleicher Helligkeit reineres (orangefreies) Rot, als das gewöhnliche Rubinglas. Dasselbe erreicht man natürlich auch, wenn man ein Rubinglas und ein helles Kobaltglas hintereinander legt.

Nächst den roten Gläsern werden die grünen am reinsten geliefert. Es gibt solche, die (neben minimalen, für die meisten Zwecke zu vernachlässigenden Mengen von Gelb bezw. Blau) gerade das gesamte Grün durchlassen. Doch sind diese Gläser nicht leicht zu bekommen und selbst eines der größten Farbglaswerke vermochte nicht, mir nach einem sehr guten vorgelegten Muster das gewünschte Grün zu liefern. Es ist aber leicht durch Kombination zweier Gläser, eines leicht gelblichen und eines bläulichen Grüns das Grün allein auszusehneiden, freilich mit etwas Lichtverlust.

Gelbe Gläser lassen im allgemeinen mit Ausnahme des Blau und Violett das ganze Spektrum fast ungeschwächt durch. Reiner sind die Gläser, die man für gewöhnlich braun nennt (Bierflasehenglas). Setzt man ein Stückchen solchen Glases in ein Loch einer undurchsichtigen Platte ein, so erscheint das durchfallende Licht rein gelb, d. h. weder grünlich- noch orangegelb. Spektroskopisch untersucht zeigt es außer Gelb noch wechselnde Mengen von Orange bis Rot und Gelbgrün, also Farben, die sich nach den bekannten Mischungsgesetzen zu einem gesättigten Gelb mischen können. Nur wenn Grün von kleinerer Wellenlänge als 540 $\mu\mu$ in merklicher Menge durchgelassen wird, wird das Gelb ungesättigt.

Gläser, die rein blau, nicht violettblau und nicht grünblau aussehen, lassen niemals nur blau durch, sondern stets gewisse, sich kompensierende Mengen von Grün und Violett. Rein violette Gläser gibt es neuerdings (vergl. Tab. 3 auf S. 47).

Für manche Fälle nützlich sind Gläser, die zwar längst kein einfaches Licht ergeben, aber gerade nur Licht einer bestimmten Farbe auslöschen. So absorbiert blaues Kupferglas (blaugrünlich) ganz überwiegend das Rot, und zwar wird vom Rot des Spektrums um so mehr abgeschnitten, je dicker die Schicht ist, oder je gesättigter der Glasfluß.

Die purpurfarbenen Mangangläser absorbieren das Grün, gleichfalls mit relativ scharfer Begrenzung. Dickere oder stärker gefärbte Gläser löschen alles mit Ausnahme des Rot und des Blauviolett aus.

Die Jenaer Glaswerke von Schott u. Genossen haben Proben von Farbengläsern für wissenschaftliche und technische Zwecke hergestellt, über die Zsigmondy[74]) u. Grebe[28]) berichten. Ich teile hier die Angaben von Zsigmondy für einige Gläser mit, nebst einer schematischen Kurvendarstellung ihrer Durchlässigkeit. Leider sind diese Gläser zum Teil nicht im Handel, sondern müssen für den besonderen Zweck erst hergestellt werden. Die Firma ist hierbei sehr entgegenkommend.

Tabelle 3 nach Zsigmondy.

Jenaer Lichtfilter.

Laufende Nummer	Art des Glases	Fabrik-Nummer	Farbe des Glases (Nuance)	Farbe und Lage des vom Glase nicht absorbierten Teiles des Spektrums. Das Glas läßt durch	Dicke der untersuchten Glasplatte in mm
1	Kupferrubinglas	2728	tiefrot	nur Rot bis $\lambda = 0{,}6\ \mu$	1,7
1a	Goldrubinglas	459 III	rot	Rot, Gelb, in dünner Lage auch Blau und Violett	
2	Uranglas	454 III	hellgelb	Rot, Gelb, Grün bis *Eb*; in dünner Schicht auch Blau	16
2a	„	455 III	hellgelb, stark fluoreszier.		
3	Nickelglas	440 III	hell gelb-braun	Rot, Gelb, Grün, letzteres geschwächt, auch stark geschwächtes Blau	11
4	Chromglas	414 III	gelbgrün	Gelbgrün, Absorption nahe mit der des Zettnow-Filters übereinstimmend	10
4a	„	433 III	grünlichgelb	Rot und grün; von $\lambda = 0{,}65$ bis $\lambda = 0{,}50\ \mu$	5
4b	grünes Kupferglas	431 III	grün	Grün, Gelb etwas Rot und Blau	2 bis 3
5	Chromglas	432 III	gelbgrün	Gelbgrün, etwas Rot	2,5
6	Kupfer-Chromglas	436 III	grasgrün	Grün;	5
7	Grünfilter	437 III	dunkelgrün	„	5
8	„	438 III	„	„	5
10	Kupferglas	2742	blau, wie $CuSO_4$	Grün, Blau, Violett	5 bis 12
11	Blauviolettglas	447 III	blau wie Kobaltglas	Blau, Violett	5
	„		„	Blau, Violett, geschwächtes Blaugrün, *kein Rot*	2 bis 5
12	Kobaltglas	424 III	blau	Blau, Violett und das äußerste Rot	4 bis 5
13	Nickelglas	450 III	dunkelviolett	Violett zwischen *G* und *H* und das äußerste Rot	6
14	Violettglas	452 III	„	Violett zwischen *G* und *H*, etwas geschwächt	7

Außerdem liefern Schott und Genossen speziell für die Zwecke der Dreifarbenphotographie sehr gute Rot-, Grün- und Blaufiltergläser, außerdem verschiedene Gelbgläser, welch letztere aber natürlich einen sehr großen Teil des Spektrums durchlassen und hier nicht interessieren.

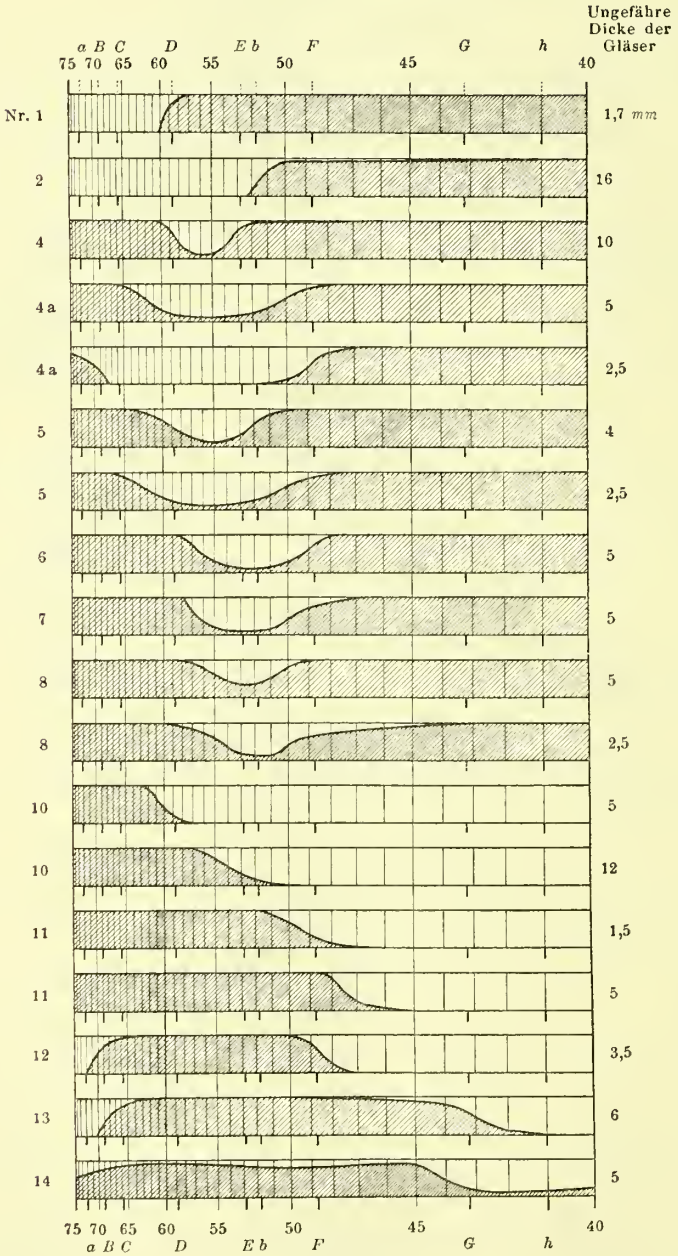

Ungefähre Dicke der Gläser
a B C D E b F G h
75 70 65 60 55 50 45 40
Nr. 1
1,7 mm
2
16
4
10
4 a
5
4 a
2,5
5
4
5
2,5
6
5
7
5
8
5
8
2,5
10
5
10
12
11
1,5
11
5
12
3,5
13
6
14
5
75 70 65 60 55 50 45 40
a B C D E b F G h

Fig. 22.

Für die genannten Dreifarbenfilter werden folgende Absorptionsmessungen mitgeteilt.

Wellenlänge	Rotfilter	Grünfilter			Blaufilter		
	1 mm dick	1 mm	2 mm	3 mm	1 mm	2 mm	3 mm
644 $\mu\mu$	0,939	0,168	0,0179	0,0024	0,00135	—	—
578	0,0498	0,501	0,251	0,102	0,0143	—	—
546	0,0179	0,644	0,441	0,168	0,0285	—	—
509	0,0018	0,618	0,382	0,236	0,132	0,0773	—
480	0,00031	0,439	0,193	0,0848	0,359	0,129	0,0463
436	—	0,009	—	—	0,431	0,186	0,0803
405	—	—	—	—	0,348	0,121	0,0422

Solche Gläser dürften auch für physiologisch-optische Zwecke vielfach verwendbar sein. Zu beachten ist insbesondere das praktisch rotfreie Blaufilter.

Bei Schott u. Gen. in Jena erhält man übrigens auch verschiedene Sorten von farblosem oder violettem Glas, das für ultraviolette Strahlen in hohem Grade durchgängig ist.

c) Farbige Gelatine, Papiere und ähnliche Lichtfilter. Bei den dünnen Gelatineblättern, deren Verwendung Kirschmann[36]) empfohlen hat, überwiegen die oben erwähnten Nachteile in den meisten Fällen über die Vorteile. Da die einzelnen Blätter ziemlich schwach gefärbt sind, kann man durch Kombination mehrerer Blätter verschiedene Zwischenfarben und Sättigungsstufen bequemer als auf andere Weise herstellen*).

Wertvoller in mehrfacher Hinsicht sind die auf Glas gegossenen Gelatineplatten, die man sich nach Angaben von G. Fritsch[25]) selbst herstellen kann. Diese Filter sind zunächst für die Dreifarbenphotographie bestimmt und teilen demgemäß das ganze Spektrum in 3 Teile rot bis orange, gelb, gelbgrün bis blaugrün, blau bis violett. In der Schärfe der Trennung an der Gelbgrenze sind diese Fritschschen Filter unerreicht. Das Orangerot wie das Grün sind sehr lichtstark, erscheinen aber, hintereinander gelegt, absolut undurchlässig, — sind somit zu Demonstrationen sehr geeignet. Leider ist die Haltbarkeit natürlich begrenzt, doch kann man bei Vermeidung zu intensiver Bestrahlung mit Sonnen- oder Bogenlicht jahrelang mit den Fritschschen Filtern arbeiten.

Die Gelatine muß von bester Qualität sein; man läßt sie in kaltem Wasser eine Stunde quellen, schmilzt sie dann im Wasserbad, verdünnt auf doppeltes Volumen und filtriert. In den folgenden Rezepten ist die Gewichtsmenge Gelatine für die gequollene, aber nicht verdünnte Gelatine gerechnet.

Rezepte (nach G. Fritsch) für Gelatinefilter.

Rotfilter:

Kongorot	0,2
Wasser	35,0
Alkohol	10,0
Gelatine	10,0

Grünfilter (rotfrei):

I. Naphtolgrün	0,4
Wasser	40,0
II. Doppelgrün	0,05
Wasser	20,0

Einzeln lösen, filtrieren, zur Mischung zusetzen:

Alkohol	10,0
Gelatine	15,0

*) Größere Papiergeschäfte liefern solche Gelatinen, außerdem Herr E. Zimmermann, Leipzig, Emilienstr. 21.

Grünfilter:

I.	Brillantgrün	0,2
	Wasser	40,0
	Alkohol	20,0
II.	Naphtolgelb	0,05
	Wasser	20,0
III.	Gelatine	20,0

Grünfilter mit Tartrazin:

Lichtgrün	0,5
Tartrazin	0,3
Alkohol	10,0
Wasser	200,0
Acid. acet.	10,0 gutt.

Mit Gelatine begossene Spiegelglasplatte (ausfixierte Bromsilberplatte) 1 bis 2 Stunden in der Flüssigkeit imbibieren, ohne zu waschen gut ablaufen lassen, an staubfreiem Ort zum Trocknen aufrecht stellen.

Blaufilter:

Viktoriablau	0,3
Alkohol 70 %	50,0
Methylviolett	0,1
Wasser	20,0
Gelatine	15,0

Violettfilter:

Methylviolett	0 2
Alkohol	5,0
Wasser	40,0
Gelatine	15,0

Die geschmolzene Masse wird auf gut gereinigte horizontal gelegte Spiegelglasplatten gegossen. Nach dem Trocknen wird eine zweite Platte mit Balsam auf der Farbplatte festgekittet.

c) Flüssige Strahlenfilter. In noch höherem Maß als die auf Glas gegossenen Gelatineplatten bieten die flüssigen Lichtfilter den Vorteil, daß man durch Wechsel der Schichtdicke und der Konzentration das Absorptionsvermögen quantitativ genau abstufen und außerdem durch Mischung verschiedener Lösungen den ausgeschnittenen Spektralbezirk in oft weiten Grenzen verschieben kann.

Die Gefäße, in denen die Flüssigkeiten zur Verwendung kommen, sind je nach dem speziellen Zweck und auch nach der Beschaffenheit der Flüssigkeit selbst sehr verschieden.

Wo horizontale Schicht zulässig ist, ergibt es sich als das einfachste, Glasschalen mit ebenem Boden zu verwenden (z. B. sog. Petrischalen). Für die häufiger gewünschte vertikale Stellung der Schicht genügen in manchen Fällen die ganz billigen, in vielen Größen zu erhaltenden eckigen Flaschen mit parallelen Wänden. Die größeren Handlungen für chemischen Bedarf führen auch solche mit geschliffenen Wänden, die recht praktisch sind und auch in sehr verschiedenen Größen hergestellt werden.

Wo es auf ganz gleichmäßige Schichtdicke ankommt, müssen parallelwandige Tröge mit geschliffenen Wandflächen benutzt werden. Außer den einfachen, oben offenen Trögen werden auch solche geliefert, die einen aufgeschliffenen abnehmbaren Glasdeckel haben, oder einen festen Deckel mit Loch und eingeschliffenem Stöpsel.

Der Kitt, mit dem viele dieser Tröge gekittet zu sein pflegen, verträgt Mineralsäuren selbst in großer Verdünnung nicht. Auch andere Flüssigkeiten läßt man zweckmäßigerweise nur so lange im Trog, wie dieser gebraucht wird, da die Reinigung sonst schwierig ist.

Besser, aber auch nicht unbegrenzt haltbar sind Tröge, die aus einem U-förmigen Stück dicken, auf beiden Seiten eben geschliffenen Glases bestehen, auf das zu beiden Seiten Spiegelglasplatten mit Kanadabalsam aufgekittet werden. Man kann auch die Platten, statt sie aufzukitten, unter Zwischenlegung eines geeignet zugeschnittenen Gummiblattes durch Schrauben aufpressen und die Tröge zum Reinigen auseinander nehmen.

Prismatische oder keilförmige Tröge gestatten die Schichtdicke einer farbigen Flüssigkeit schnell zu variieren. Soll dabei Prismenwirkung vermieden werden, so setzt man hinter den mit Farblösung gefüllten Glaskeil einen ebensolchen mit Wasser gefüllten (Fig. 22).

Keilförmige Absorbentien, die in jeder Lage benutzt werden können, lassen sich nach Oltmanns Vorschlag aus Gelatine gießen.

Um flüssige Absorbentien in bequemer Weise schnell auf verschiedene Schichtdicken bringen zu können, sind unzählige Konstruktionen angegeben worden, die in den verschiedenen Kolorimetern Verwendung finden. Solche werden von den optischen Werkstätten von Fr. Schmidt und Haensch, sowie von Zeiss u. a. hergestellt.

Zusammensetzung flüssiger Strahlenfilter. Manche flüssige Filter lassen sich aus einer einzigen, in Wasser oder Alkohol gelösten Substanz herstellen, andere verlangen die Mischung mehrerer Stoffe. Da die Mischungen großenteils viel weniger beständig sind, als getrennte Lösungen (besonders Mischungen von Anilinfarben mit Mineralstoffen), ist es oft vorteilhaft, zwei hintereinander gesetzte Tröge zu verwenden. Unumgänglich wird das, wenn die Farbstoffe miteinander Umsetzungen eingehen, Niederschläge erzeugen usw.

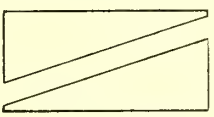


Fig. 22.

Ich gebe in folgendem einige Farblösungen an, die häufig Verwendung finden können. (Vergl. Lit. [55].)

Rot. Sehr gute, licht- und luftbeständige Filter, die schon in wenigen Millimeter Schichtdicke alle nichtroten Strahlen absorbieren, erhält man durch Karminlösungen, und zwar am besten mit Lithionkarmin. Sehr dünne Lösungen oder Schichten lassen auch Blau und Violett durch. Verwendet man eine Lösung, die nur noch Rot, kein Orange mehr durchläßt, und setzt ihr tropfenweise eine konzentrierte Lösung zu, so schränkt sich der durchgelassene Spektralbezirk vom kürzerwelligen Rot aus ein. Doch wird auch das längerwellige Rot gleichzeitig etwas lichtschwächer.

Vergleicht man ein Lithionkarminfilter mit einem gleich hell aussehenden Rubinglas spektroskopisch, so sieht man, daß bei ersterem der Spektralbezirk enger ist, das Licht also reiner. Bei gleich breitem durchgelassenem Spektralbezirk ist das Karminfilter weit lichtstärker als das Rubinglas.

Will man ausschließlich den längerwelligen Teil des Rot, etwa die Gegend der Linie B durchlassen, so kombiniert man zweckmäßig eine Lösung von Methylgrün oder Lichtgrün mit einer Rubinglasscheibe. Letztere beseitigt das ganze Grün, erstere das kürzerwellige Rot zwischen B und C, läßt dagegen das langwellige Rot durch, ebenso wie es verschiedene andere grüne und blaue Anilinfarben tun.

Um das kurzwellige Rot und Orange isoliert zu bekommen, kombiniert man eine Rubinscheibe oder besser einen Trog mit Karminlösung mit einem

Tabelle 4

Durchlässigkeit einiger flüssiger Strahlenfilter für die Lichter versehiedener

Die durch kein Absorbens geschwächte Intensität

Wellenlänge in μμ	748	730	713	696	680	664	649	635	622	609	597	586	576	566	557
Lithionkarmin 0,1 %	70	75	79	80	76	67	55	30	10	2	—	—	—	—	—
Fuchsin 0,1 %	66	70	73	76	77	75	70	60	45	22	10	2	—	—	—
Saffrarin 0,04 %	75	80	85	87	87	85	81	74	64	45	25	8	3	—	—
Bichromsaures Kalium 5 %	45	55	63	72	80	87	94	90	80	80	87	87	80	70	60
Monochromsaures Kalium 5 %	73	80	86	92	95	94	90	89	90	94	96	96	96	95	94
Pikrinsäure 1 %	78	85	91	95	97	97	91	91	90	90	90	90	90	90	50
Orange G (Grübler) 1 %	85	88	89	90	90	90	90	90	90	88	80	65	45	15	1
Lichtgrün (Grübler) 0,25 %	80	75	60	33	9	2	—	—	—	—	—	—	—	1	4
Methylgrün (Grübler) 0,0001 %	67	65	62	55	24	4	0,5	—	—	—	—	—	0,5	1	4
Kupferacetat, gesättigte Lösung	—	—	—	1	2	4	7	14	24	35	44	52	59	65	70
Cuprammoniumsulfat 5 %	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pikrinsäure 1 gr. gesätt. Lösung von Kupferacetat 100 gr.	—	—	—	—	—	2	3	5	8	13	19	30	42	55	65

blauen Kupferglas oder einer Lösung von Kupferacetat in geeigneter Konzentration. Mit letzterer Lösung kann man vom äußersten Rot her beliebig große Portionen des Rot wegschneiden, freilich nicht mit sehr scharfer Grenze.

Gelb. Ein Gelbfilter, das wirklich nur rein gelbe Strahlen durchläßt, gibt es nieht, wie leicht begreiflich, da der Bezirk im Spektrum, der das normale „reine Gelb“ zeigt (also weder Orangegelb noch Grüngelb), außerordentlich eng ist. Man muß stets einen Streifen Orange- oder Gelbgrün mit in Kauf nehmen, die sich durch Mischung im Auge zu reinem Gelb vereinigen. Ein solches Filter läßt sich (allerdings nur kurze Zeit haltbar) herstellen, wenn man in Kupferacetatlösung, die das ganze Rot und den größten Teil des Orange löscht, tropfenweise gesättigte mit Essigsäure angesäuerte Lösung von Orange G tröpfelt, bis nur noch ein schmaler Streifen Gelbgrün durchgelassen wird. Bringt man die beiden Lösungen in getrennte Tröge, so ist das Filter haltbar.

Das Zettnowsche Kupfer-Chromfilter[72]) ist ein Filter für Grüngelb und wird naeh Angaben des Autors hergestellt durch folgende Mischung:

(nach G. Busck).

Wellenlänge, bei 10 mm Schichtdicke. Lichtquelle: Nernstlampe.

jeder einzelnen Lichtart ist = 100 gesetzt.

548	540	532	525	518	511	505	499	493	487	477	472	467	457	452	447	443	439	435
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
43	15	6	3	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
91	88	84	80	74	63	48	32	15	5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
92	95	94	90	82	69	50	25	9	3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	14	25	33	42	48	51	51	46	38	14	5	3	—	—	—	—	—	—
6	10	15	20	28	40	50	60	68	72	75	75	72	63	50	36	30	26	—
75	79	81	83	84	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
—	—	—	—	—	0,5	1	2	4	6	12	17	21	28	35	42	46	49	50
71	74	75	75	73	65	50	25	9	4	1	—	—	—	—	—	—	—	—

Kupfernitrat 160 g, reine Chromsäure 14 g, Wasser 250; je nach dem gewünschten Spektralbezirk zu verdünnen.

Anderes Rezept: Kupfersulfat 175 g, Kaliumbichromat 17 g, Wasser 1000 g. Schichtdicke 1 bis 2 cm. Durchgelassener Bezirk je nach Schichtdicke und Spaltweite 580—560 mm bis 590—545, also engere oder weitere Bezirke aus dem Gelbgrün. Nimmt man den Kupfergehalt geringer, den Chromsäuregehalt hoch, so erhält man ein Gelbbraun aussehendes weder grünliches noch orangefarbenes Gemisch.

Grün läßt sich durch mannigfache Kombinationen rein gewinnen und zwar sowohl das ganze Grün vom Grüngelb an bis zum Blaugrün, wie auch einzelne Teile. Zunächst kann man die oben erwähnten Fritschschen Rezepte natürlich auch in flüssiger Form anwenden.

Gelbgrün erhält man sehr lichtstark und haltbar, wenn man in gesättigter, mit Essigsäure angesäuerter Lösung von Kaliumbichromat so viel Kupferacetat löst, wie sich lösen will. Je nach der Schichtdicke ist der lichtstark durchgelassene Bezirk verschieden groß, bei 1 cm Dicke etwa von

580 $\mu\mu$ bis 530 $\mu\mu$. Statt des Bichromates kann auch Pikrinsäure verwendet werden.

Setzt man den genannten Mischungen gesättigte Lösung von Kupferacetat zu, so erweitert sich der durchgelassene Bezirk immer weiter nach dem Blau hin.

Grün ohne Gelbgrün erhält man, indem man in gesättigte Lösung von Kaliummonochromat ammoniakalische Lösung von Kupferammoniaksulfat einfließen läßt, bis der gewünschte Spektralbezirk, etwa 535—495 $\mu\mu$, abgegrenzt ist.

Blaugrün mit Cyanblau erhält man, indem man gesättigte Lösung von Methylgrün oder Jodgrün in angesäuerte Kupferacetatlösung tropft.

Cyanblau allein wird durchgelassen, wenn man in der letztgenannten Lösung das Blaugrün durch Zusatz von ein paar Tropfen Gentianaviolett-Lösung auslöscht, oder (besser) durch Kombination mit einem zweiten Trog, der eine schwache Lösung von Kaliumpermanganat enthält. Letztere, die nur kurze Zeit haltbar ist, kann auch durch ein purpurfarbenes Manganglas ersetzt werden.

Das gesamte Blau erhält man, indem man bei den genannten Kombinationen die Menge des Methylgrün kleiner nimmt, so daß auch noch Indigo durchgeht.

An einigen der genannten flüssigen Lichtfilter hat auf meine Veranlassung G. Busck[9 10]) genauere Feststellungen über das Absorptionsvermögen gemacht und zwar bei denselben Konzentrationen, in denen ich die Lösungen zu verwenden pflege. Die Angaben beziehen sich auf eine Schichtdicke von 10 mm. Gemessen wurde mit dem Helmholtzschen Spektrophotometer unter Benutzung von Nernstlampen als Lichtquellen. Die Durchlässigkeitswerte sind natürlich nur relative. Bei anderen Konzentrationen oder Schichtdicken würden sich die Kurven des Absorptionsverbrauchs zum Teil wesentlich anders darstellen. Beim Karmin z. B. kommt bei viel dünneren Lösungen auch eine merkliche Durchlässigkeit für Blau zum Vorschein.

Ferner teile ich die Landoltschen Rezepte mit[43]):

Rot: Kristallviolett 5 BC (Aktiengesellschaft f. Anilinfarben Berlin S.O.) gibt in geeigneter Schichtdicke ein rotes Band mit scharfer Grenze gegen Orange, außerdem Blauviolett, das beseitigt werden muß. Es werden 2 Tröge hintereinander gestellt.

Trog I	0,05 g wasserfreies Kristallviolett in wenig Alkohol gelöst, verdünnt auf 1000 cbcm Wasser	Schichtdicke	20 cm
Trog II	10 g Kaliummonochromat, 100 cbcm Wasser Durchgelassener Bezirk bei Koll.-Spalt 0,25 mm von 718 bis 639 $\mu\mu$.	„	20 „
Gelb:	I Nickelsulfat 30 g, Wasser 100 g . .	„	20 „
	II Kaliummonochromat 10:100	„	15 „
	III Kaliumpermanganat 0,025:100 . . . (Bezirk: 614—574).	„	15 „
Grün:	I Kupferchlorid 60, Wasser 100 . . .	„	20 „
	II Kaliummonochromat 10:100 . . . . (Bezirk: 540—505).	„	20 „

Blaugrün und
Cyanblau: I Doppelgrün SF 0,02:100 Wasser . Sehichtdicke 20 cm
II Kupfersulfat 15:100 . . . . . „ 20 „
(Bezirk: 526—458).
Blau: I Kristallviolett 5 BC 0,005:100 . . . „ 20 „
II Kupfersulfat 15:100 . . . . . „ 20 „
(Bezirk: 478:460).

3. Spektrale Liehtzerstreuung.

a) Allgemeines. Zur Gewinnung spektraler Lichter steht das Dispersionsspektrum und das Gitter-(oder Interferenz-)Spektrum zur Verfügung. Die Unterschiede im Aussehen beider sind bekannt. Das Interferenzspektrum wird immer dann zu bevorzugen sein, wenn es für die Versuchsanordnung wiehtig ist, daß gleichen Abständen im Spektrum gleieher Unterschied der Wellenlänge entspricht, und wo die relativ große Lichtstärke im Blau und Violett von Bedeutung ist. Für die physiologiseh-optischen Untersuchungen kommen diese Umstände verhältnismäßig selten in Betraeht, dagegen erweist sieh häufig die geringere Gesamtlichtstärke des Gitterspektrums gegenüber dem prismatischen als ungünstig. Die guten Rowlandschen Gitter werden übrigens m. W. zur Zeit gar nicht mehr gefertigt und die Thorpschen billigen Abdrüeke leisten längst nieht dasselbe. Ein Naehteil, der sieh bei Verwendung solcher Gitter recht störend bemerkbar macht, ist die nicht unbeträchtliche Beimischung diffusen unzerlegten Lichtes, das die Sättigung des ganzen Spektrums vermindert. Das maeht sich aueh in Ashers Farbenmisehapparat geltend. Ich bevorzuge daher das Dispersionsspektrum für fast alle Zwecke.

Neben dem einfachen dreiseitigen Flintglasprisma der älteren und einfachen Spektralapparate kommen zahlreiche Neukonstruktionen in Betraeht; näheres Eingehen auf sie ist hier nicht möglich. Erwähnt seien das Rutherfordprisma, die verschiedenen geradsichtigen Prismenkombinationen („à vision directe“) und endlich das kompliziert gebante Prisma mit konstanter Deviation, auf das wir nnten noch zurückkommen werden. Alle diese Prismen haben eine größere Dispersion als die einfaehen dreiseitigen, geben daher ceteris paribus reinere Lichter.

Vielfach benutzt man auch Hohlprismen, die mit Schwefelkohlenstoff oder Zimtsäure-Äthylester gefüllt sind. Besonders wenn man große Prismen braucht, empfiehlt sich die Verwendung dieser Flüssigkeiten wegen der geringeren Kosten. Das sogenannte Wernickesche Flüssigkeitsprisma enthält teils Glas, teils Zimtester als breehende Substanzen. Die Brechungswirkung dieser Prismen ist von der Temperatur merklieh abhängig.

Eine bei allen Spektralvorrichtungen (insbesondere bei Farbenmischapparaten für physiologisehe Zweeke) sehr zu beachtende Notwendigkeit ist die, auf größte Reinheit aller Prismenflächen, überhaupt aller im Strahlengang befindlichen Glas- bezw. Kalkspatflächen zu sehen. Wenn diese verstauben, oder, was bei Verunreinigung der Luft mit Säure- etc. Dämpfen leicht geschieht, mit einem feinen Hanch beschlagen, so wird dadurch die Reinheit der Lichter stark beeinträchtigt, um so mehr, je zahlreicher diese Flächen sind. Es ist zu bedenken, daß im allgemeinen in der Ebene des

Okulars das reelle Spektrum entworfen wird, also alle Lichtarten die Optik des Apparates durchsetzen und bis zum Okular gelangen. Unreinheiten der Glasflächen lassen daher gemischtes Licht im Apparat diffundieren, und vom Okular aus gesehen legt sich auf die Farbenfelder Weiß und vermindert die Sättigung, ähnlich wie dies bei den Gittern der Fall ist.

In anderer Weise noch störender sind umschriebene Flecken auf dem Glase, die ebenso wie Bläschen im Glase je nach ihrer Lage als schwarze oder als farbige Flecken im Gesichtsfeld sichtbar werden. Besonders ungünstig sind Fingerabdrücke, deren Spuren schwer zu beseitigen sind. Bei feineren Apparaten müssen die Glasflächen vor solchen Berührungen geschützt sein, ebenso vor jedem überflüssigen Luftzutritt, der Staub und Dämpfe mit sich bringen kann.

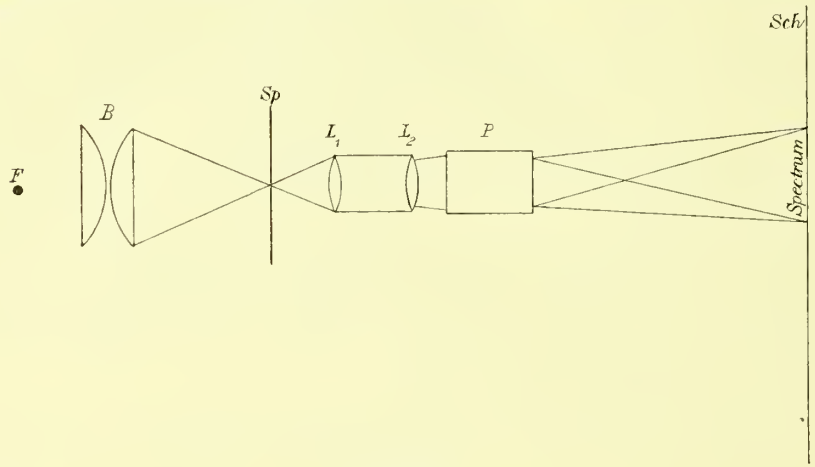


Fig. 23.

Für alle hier in Betracht kommenden Spektralbeobachtungen zu berücksichtigen ist natürlich, daß Okular- und Kollimatorspalt untereinander und mit den Kanten des Prismas genau parallel stehen müssen, ferner daß das Prisma für Lichter mittlerer Wellenlänge im Minimum der Ablenkung orientiert sein muß.

b) Schematische Darstellung der hauptsächlichsten Anordnungen für physiologische Beobachtungen am Spektrum.

Objektives Spektrum. Auf den Spalt Sp wird durch das Beleuchtungssystem B der von der Lichtquelle (Sonne, Bogenlampenkohle, Nernststäbchen) F ausgehende Strahlenkegel konzentriert. Das Linsensystem L_1 L_2 bildet den Spalt vergrößert auf dem weißen Schirm Sch ab. Nach Erzielung scharfer Abbildung wird das Prisma P vor die Linse gesetzt (Fig. 23).

Zur Sichtbarmachung einzelner Spektralfarben auf dunklem Grunde wird der Schirm Sch entfernt, und an seine Stelle in gleicher Ebene ein mehr oder weniger schmaler weißer Papierstreifen senkrecht aufgehängt, der dann in einer Spektralfarbe leuchtet. Will man noch kleineres Feld, so befestigt man ein kleines Papierschcibchen an einem matt schwarzen Draht und bringt es in die Abbildungsebene Sch. Auf diese Art ermittelt man z. B. leicht

die neutralen Stellen im Spektrum für die drei Typen von Dichromaten und bei pathologischen Farbensinnsformen.

Will man einzelne Spektralteile auf ganz schwarzem Grunde haben, so verlegt man die Ebene Seh auf eine Tür, die 2 Dunkelzimmer trennt, oder auf die Vorderwand eines großen innen geschwärzten Kastens. In diese Fläche wird ein Ausschnitt von der Größe des ganzen Spektrums gemacht

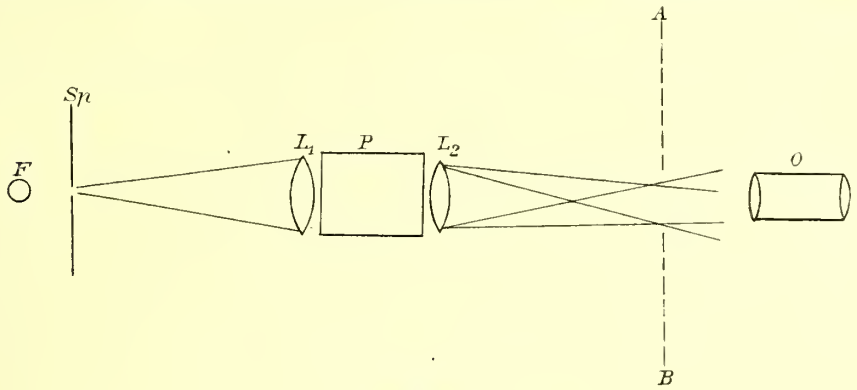


Fig. 24.

und vor diesem dann das erwähnte weiße Objekt zum Auffangen isolierter Lichter angebracht.

Subjektives Spektrum. Die übliche Anordnung zur Betrachtung des ganzen Spektrums (eventuell Absorptionsstreifen, Fraunhofersche Linien, Metallspektren, Funkenspektren) zeigt Fig. 24. Der Spalt Sp wird durch die Linsen L_1 und L_2 in der Ebene AB abgebildet. Er befindet sich im Brennpunkt von L_1. Zwischen L_1 und L_2 steht das Prisma P. Mit dem Okular O als Lupe betrachtet man das in der Ebene AB befindliche Spektrum. In dieser Ebene kann man Diaphragmen in Schieberform anbringen, die gestatten, Teile des Spektrums zu verdecken, die bei der Beobachtung stören würden.

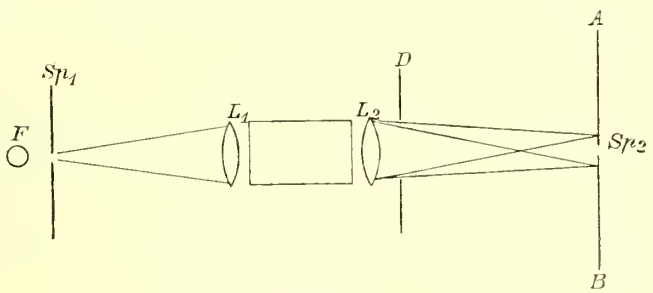


Fig. 25.

Für physiologisch-optische Zwecke wird jetzt die zuerst von Maxwell (53) angewandte Anordnung viel gebraucht, die gestattet, eine etwas größere Fläche, nämlich die Prismafläche in einem bestimmten homogenen Licht leuchten zu sehen (ohne das übrige Spektrum). Dabei fällt (Fig. 25) das Okular weg und an seiner Stelle ist ein Okularspalt in der Abbildungsebene des Spektrums angebracht. Das an diesen Spalt möglichst nahe heranzubringende Auge sieht dann die Linsenfläche L_2 in einem homogenen

Licht, dessen Wellenlänge entweder durch Verschiebung von Sp_2 oder von Sp_1 (samt Lichtquelle und Kollimatorlinse L_1) oder durch Drehen des Prismas beliebig gewählt werden kann.

Die beiden Spalte müssen in konjugierten Ebenen liegen, wenn das Licht ein wirklich homogenes sein soll. Ob diese Bedingung erfüllt ist, prüft man, indem man vor den ganz eng gestellten Spalt Sp_1 eine Lichtquelle mit scharfem Linienspektrum (Natriumflamme, Quecksilberlampe, Heliumröhre) bringt, deren Bild durch die Linse L_2 auf dem (Okular-)Sp_2 entworfen wird, und nun diesen Okularspalt durch eine vorgesetzte Lupe betrachtet. Erscheinen die Ränder von Sp_2 und das Bild von Sp_1 gleichzeitig scharf und zeigen sie bei seitlichen Bewegungen des Kopfes keine Parallaxe, so ist die Einstellung richtig.

Wichtig und in verschiedener Weise ausführbar ist die Anbringung der Lichtquelle vor dem Spalt Sp_1. Dieser muß in allen seinen Teilen gleichmäßig beleuchtet sein und die Strahlen müssen so verlaufen, daß Sp_1 selbst als Lichtquelle für das dahinter liegende optische System dient. Dies kann erreicht werden, indem man an Sp_1 eine Milchglasscheibe dicht anlegt. Das bedingt natürlich beträchtlichen Lichtverlust. Man kann auch die Lichtquelle, wenn sie an sich eine genügend große Fläche (größer als der Spalt) und gleichmäßige Intensität besitzt, in beliebig größerem Abstand von Sp_1 anbringen.

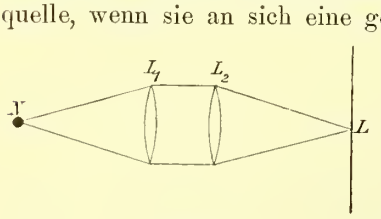


Fig. 26.

Bleibt Sp_1 in seiner Weite konstant, so kann man die Lichtquelle durch ein Linsensystem (Fig. 26) in der Spaltebene abbilden, z. B. wie Gullstrand empfiehlt ein Nernststäbchen. Dabei wird eine so große Lichtmenge auf den Spalt konzentriert, daß man diesen sehr eng nehmen kann. Bei meinem Farbenmischapparat (den die optische Werkstätte Fr. Schmidt und Haensch konstruiert hat) ist die Gleichmäßigkeit der leuchtenden Fläche auf andere Art erreicht, s. o. S. 3 unten.

Als ein großer Vorzug gegenüber früheren Konstruktionen erscheint mir das bei diesem Farbenmischapparat neuerdings angewandte Verfahren zur Einstellung verschiedener Wellenlängen. Bei diesem Apparat stehen sowohl der Kollimatorspalt wie der Okularspalt ganz fest, und nur das Prisma „mit konstanter Deviation“ ist drehbar. Die Drehung einer solchen relativ kleinen Masse von geringer räumlichen Ausdehnung läßt sich durch sehr feine Schrauben äußerst exakt und leicht bewirken.

Für den häufig eintretenden Fall, daß man bei physiologisch-optischen Untersuchungen ein Feld von 1 bis ca. 6^0 Gesichtswinkel mit einem bestimmten homogenen Licht erleuchten und von einem großen irgendwie beleuchteten Feld umgeben betrachten will (etwa bei Versuchen nach der Heringschen Fleckmethode), bewährt sich die oben S. 57 kurz beschriebene Methode in einer Ausgestaltung, wie sie bei den Untersuchungen von v. Kries vielfach verwendet worden ist, und die in Fig. 27 in einer der verschiedenen denkbaren Spezialformen wiedergegeben ist.

Die Lichtquelle, etwa ein Auerbrenner B beleuchtet den Kollimatorspalt C Sp, der am Ende des Rohres R angebracht ist. Am anderen Ende

von R befindet sich die Linse L_1, in deren Brennpunkt C Sp liegt. B und R sind fest miteinander verbunden und können durch eine Schraube gemeinsam um den Punkt X, den Mittelpunkt der Linse L_1 gedreht werden. Die Größe der Drehung zeigt der Index J an der Skala Sc an. Dicht an R anstoßend, aber mit ihm nicht fest verbunden ist die geradsichtige Prismenkombination P, an deren anderem Ende sich die Linse L_2 befindet. Ein in deren Brennpunkt befindliches Auge sieht die Fläche von L_2 mit einem homogenen Licht erleuchtet, dessen Wellenlänge durch Drehung des Systems L_1 R C Sp, B J willkürlich gewählt werden kann.

In dem vorderen Brennpunkt von L_2 kann nun, wie in der Fig. 27 angenommen, ein Okularspalt (Oc Sp) angebracht werden, der mit dem Rohr, das den Prismakörper P enthält, irgendwie fest verbunden ist. Durch eine vor L_2 angebrachte Fläche F mit beliebig zu wählender Öffnung Ö kann der Gesichtswinkel reguliert werden, unter dem das farbige Licht sichtbar wird.

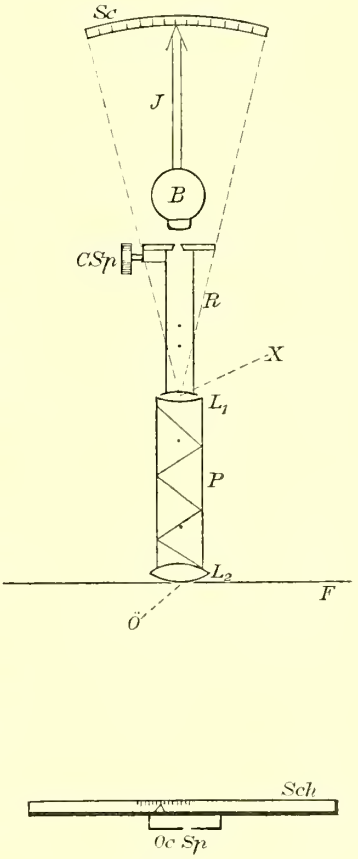


Fig. 27.

Natürlich kann man auch C Sp feststehen lassen und Oc Sp seitlich längs einer mit Skala versehenen Schiene Sch verschieben und dadurch die Wellenlänge ändern. Noch besser würde eine Einrichtung sein, bei der sowohl C Sp wie Oc Sp feststehen und statt des geradsichtigen Prismenkörpers P ein Prismenkörper mit konstanter Deviation, um seine vertikale Achse drehbar, angebracht ist, durch dessen Drehung die Wellenlänge variiert wird.

Die Intensität kann, wie in Fig. 27 angenommen, durch Änderung der Weite von C Sp erfolgen, oder, wenn man die damit verknüpfte Änderung der Reinheit des Spektrums vermeiden will, so kann man die von Gullstrand[29]) (s. S. 58) beschriebene Anordnung verwenden und eine Lichtquelle, etwa ein Nernststäbchen in der Ebene des (unveränderlichen) Kollimatorspalts durch ein Linsenpaar abbilden und zwischen diese Linsen ein Paar gegeneinander verdrehbarer Nicolscher Prismen anbringen, wie es schon im Helmholtzschen Farbenmischapparat zur Intensitätsregulierung neben Spaltweitenänderung benutzt wurde.

c) Eichung von Spektralapparaten. Die Eichung der beschriebenen Spektralvorrichtungen erfolgt mittels der oben S. 6 u. 7 angegebenen Lichtquellen, die ein Linienspektrum geben. Hierdurch legt man für einzelne bestimmte Wellenlängen die entsprechenden Punkte der Skala fest, an der die Verschiebung sei es des Okularspaltes, sei es des Kollimatorrohres oder die Drehung des Prismas abgelesen wird. Für die übrigen Wellenlängen kann

man dann graphisch interpolieren, indem man auf Millimeterpapier die Teilstriche der Skala als Abszissen, die Wellenlängen als Ordinaten aufträgt. Hat man für eine genügende Zahl von Wellenlängen die zugehörigen Teilstriche bestimmt, und die ihnen entsprechenden Punkte im Koordinatensystem eingetragen, so kann man diese Punkte durch eine Kurve verbinden und somit auch die übrigen Wellenlängen zu den Teilstrichen in die richtige Beziehung setzen.

Will man rechnerisch interpolieren, so bedient man sich der Cauchyschen Dispersionsformel:

$$T = A + \frac{B}{\lambda^2},$$

worin T der Skalenteilstrich ist, dem die Wellenlänge λ entspricht. Man berechnet die Größen A und B für ein bestimmtes Intervall des Spektrums, z. B. für die Strecke von der Lithiumlinie ($\lambda = 670{,}8$) bis zur Natriumlinie ($\lambda = 589{,}2$) als 2 Unbekannte aus 2 Gleichungen. Für jede Wellenlänge, die zwischen 670,8 und 589,2 liegt, erhält man nun das zugehörige T durch Einsetzen der gefundenen Werte für A und B., und umgekehrt.

Ebenso verfährt man für die Strecke zwischen der Natrium- und der Thalliumlinie, wo die Werte für A und B andere sind, usf. Je enger die für die Berechnung von A und B gewählten Punkte auf der Skala beieinander liegen, desto genauer wird die Interpolation.

Hat man sich auf Grund dieser Berechnung eine Tabelle für die korrespondierenden Werte von T und λ angelegt, so braucht man im allgemeinen nur von Zeit zu Zeit für irgend eine bestimmte Linie zu kontrollieren, ob der zugehörige Wert T noch stimmt. Bei allen Apparaten, die ich zu Gesicht bekommen habe, sind größere und kleinere Verschiebungen aus unbekannten Ursachen unvermeidlich, weshalb es sich empfiehlt, namentlich an größeren, komplizierten Spektralapparaten vor (und womöglich auch nach) jedem wichtigen Versuch eine Linie zu kontrollieren.

d) Die Unreinheit des Spektrums. Da der Kollimatorspalt des Spektralapparates keine mathematische Linie darstellt, sondern eine gewisse Breite hat, muß das entworfene Spektrum stets eine gewisse Unreinheit zeigen. Wird, wie bei der Helmholtzschen Anordnung, das Spektrum objektiv in der Ebene des Okular- (oder Austritts-)spaltes entworfen, so hat man sich hier eigentlich eine große Zahl von Spektren zu denken, die um eine Kleinigkeit gegeneinander verschoben sind, um so mehr, je breiter der Kollimator- (oder Eintritts-)spalt ist. Für das vor dem Okularspalt befindliche Auge tritt noch eine zweite Ursache der Unreinheit hinzu, nämlich die nicht zu vernachlässigende Breite des Okularspaltes. Durch die dem rechten Spaltrand benachbarten Spaltteile tritt ein anderes Licht aus, als neben dem linken Spaltrand und als in der Spaltmitte. Alle diese Lichtarten mischen sich im Auge des Beobachters.

Um die Unreinheit möglichst gering zu machen, ist es angezeigt, die Spalte möglichst eng zu machen. Eine Grenze ist der Spaltverengerung praktisch häufig schon durch die Intensitätsverhältnisse gezogen, indem mit enger werdendem Spalt die durchgelassene Lichtmenge sinkt, wodurch man also eventuell zur Verwendung intensiverer Lichtquellen gezwungen wird. Weiterhin stellen sich aber auch die Beugungserscheinungen bei sehr engen

Spalten störend ein. Für den Okularspalt sind schon Spaltweiten um $^1/_{10}$ mm sehr bedenklich, während beim Kollimatorspalt für manche Zweeke ohne Schaden auf $^1/_{20}$ mm heruntergegangen werden kann.

Die Messung der Unreinheit des Spektrums, soweit sie dureh den Okularspalt bedingt ist (u_1), geschieht einfach in der Weise, daß man den ganz eng gemachten Kollimatorspalt mit homogenem Licht erleuchtet oder mit einem Licht, das ein deutliches Linienspektrum gibt, etwa einer mit Wasserstoff gefüllten Geisslerschen Röhre. Man stellt den Apparat so ein, daß die rote Linie in den Okularspalt fällt, und beobachtet diesen samt der in ihm sichtbaren Linie dureh eine Lupe. Nun stellt man den Kollimator so, daß das Linienbild eben neben dem reehten Spaltrand aufzutauchen beginnt, und liest die Kollimatorskala ab. Alsdann verschiebt man die Linie zum linken Spaltrand und liest wieder ab. Hat man die Kollimatorskala naeh Wellenlängen geeicht (s. o. S. 59), so hat man damit direkt den Grad der Unreinheit.

Es möge z. B. bei einer gegebenen Weite des Okularspaltes die Verschiebung der Linie von einem Teilstrich zum anderen 7 Teilstriche der Skala betragen, und es mögen 10 Teilstriche der Skala 12 $\mu\mu$ entsprechen, so ist die Unreinheit $u_1 = \frac{7 \cdot 12}{10} = 8{,}4\,\mu\mu$.

Um den Einfluß der Kollimatorspaltweite auf die Unreinheit (u_2) zu bestimmen, verfährt man gerade umgekehrt, d. h. man bringt die Lichtquelle vor den möglichst engen Okularspalt, stellt den Kollimatorspalt auf eine bestimmte Weite, etwa 0,1 mm und läßt nun ihn von der Lichtlinie durchwandern, unter Ablesung der Skala.

Die totale Unreinheit ergibt sich dann als die Summe der durch die beiden Spalten bedingten Unreinheiten, also $U_{total} = u_1 + u_2$.

Außerordentlieh vereinfacht wird die Bestimmung der Unreinheit durch einen Zusatzapparat, wie er an meinem mehrfach erwähnten Farbenmisehapparat angebracht ist und an jedem Spektrophotometer angebraeht werden kann. Der Apparat, der m. W. von der Firma Fr. Schmidt u. Haensch zuerst angewandt worden ist, besteht aus einem einfachen geradsichtigen Taschenspektroskop mit seitlich zu erleuchtender Wellenlängenskala. Dieses wird vor dem Okular-(Austritts-)spalt des Spektralapparates angebracht, wobei zwischen diesem Spalt und dem Eintrittsspalt des Taschenspektroskops eine Linse eingeschaltet ist, die jenen Spalt scharf auf diesem abbildet. Die beiden Spalten werden gekreuzt gestellt, wie es Fig. 28 zeigt, der Spalt des Taschenspektroskops horizontal. Dieser Spalt muß ganz eng sein. Ist nun der Kollimatorspalt des zu prüfenden Spektralapparates mit gemischtem weißem Licht erfüllt, so sieht man durch das Taschenspektroskop eine Linie in schräger Lage, wie Fig. 29 zeigt. Die schiefe Lage wird hervorgerufen durch die im Taschenspektroskop erfolgende verschiedene Ablenkung des aus dem Okularspalt austretenden Lichtes verschiedener Wellenlänge.

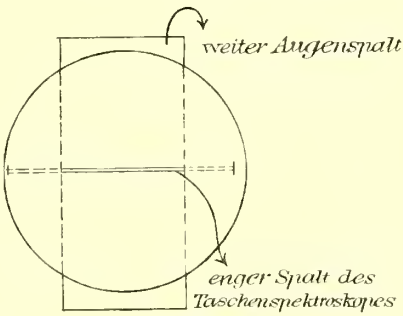


Fig. 28.

Die Linie läge horizontal, wenn nur Licht einer einzigen Wellenlänge den Spalt des Spektroskopes durchsetzen würde. Ist der Eintrittsspalt sowohl des Taschenspektroskops wie des zu prüfenden Spektroskops sehr eng, so ist diese Linie sehr fein. Die Größe u_1 in Fig. 29, an der Wellenlängenskala abgelesen, ergibt die Unreinheit des Lichtes, soweit sie hervorgerufen wird durch die Breite des Okularspaltes. Man sieht ohne weiteres, daß u_1 um so kleiner werden muß, je enger dieser (vertikale) Spalt ist.

Wird der Eintrittsspalt (Kollimatorspalt) des zu prüfenden Instruments erweitert, so nimmt die Linie die Form an, die Fig. 30 zeigt (immer noch angenommen, daß der Spalt des Taschenspektroskops ganz eng bleibt); u_2 ist dann die durch den Eintrittsspalt hervorgerufene Unreinheit. Die Summe $u_1 + u_2$ stellt die totale Unreinheit dar.

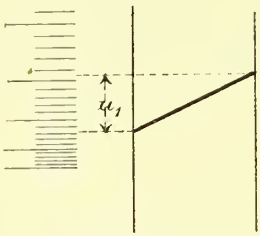


Fig. 29.

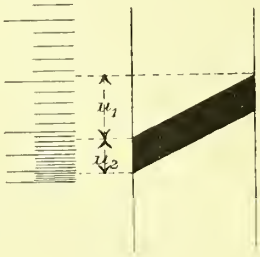


Fig. 30.

Dieser Zusatzapparat ermöglicht übrigens, wie man sieht, auch die direkte Ablesung der Wellenlänge der Lichter, die aus dem Spektralapparat austreten, macht also eine Eichung desselben für viele Fälle überflüssig. Auch wenn ein Lichtgemisch aus dem Austrittsspalt tritt, erkennt man dessen Komponenten an den verschiedenen schrägen Lichtlinien.

Einfluß der Konstruktion des Spektralapparates auf die Reinheit des Lichtes. Bei gegebenen Spaltweiten hängt der Reinheitsgrad des Spektrums noch ab 1. von der Dispersion des Prismas und 2. von den Dimensionen des Instrumentes, mit anderen Worten also von der Länge des Spektrums, das in der Ebene des Austrittsspaltes entworfen wird. Man hat sich, um die Dimensionen nicht allzugroß wählen zu müssen, bestrebt, die Dispersion möglichst groß zu machen. So verwendet man jetzt mit Vorliebe statt des einfachen Flintglasprismas das dreiteilige Rutherfordprisma, oder die geradsichtigen Prismenkombinationen, die noch höhere Dispersion ergeben.

Tabelle 5 gibt nach Messungen aus dem Laboratorium von Fr. Schmidt u. Haensch in Berlin für diese 3 brechenden Körper die Unreinheit für 4 verschiedene Spektralregionen an, und zwar nur die durch einen der Spalte bedingte Unreinheit. Eintritts- wie Austrittsspalt waren 0,5 mm breit. Die totale Unreinheit würde also durch Verdoppelung jedes der Werte erhalten werden.

Die Überlegenheit der komplizierten Prismenkörper ist offensichtlich. Zugleich sieht man, wie die geringere Dispersion für die langwelligen Strahlen die Unreinheit in dieser Spektralregion erhöht. Bei violettem Licht können

die Spalten 3 mal so weit als bei rotem Licht genommen werden, ohne die Reinheit zu verringern.

Tabelle 5.

Dispersion:		Flintglasprisma C — F = 1°56′	Rutherfordprisma C — F = 3°26′	Prismenkörper à vision directe C — F = 5°30′
Unreinheit u_i in $\mu\mu$ für die Lichter:	rot $\lambda = 650$	12	9	7
	gelb $\lambda = 580$	11	6—7	4
	blau $\lambda = 450$	6—7	4	2,5
	violett $\lambda = 400$	4	3	1,5

Bei gegebener Dispersion ist das objektive Spektrum, das in der Ebene des Okularspaltes entworfen wird, um so länger, je größer die Brennweite der Linsen ist und je größer demnach die Dimensionen des Apparates sind. Größere Apparate geben also ceteris paribus reinere Lichter. Da die langen Rohre unhandlich sind, hat v. Kries[24]) bei einem Teil seiner Versuche einen Farbenmischapparat verwendet, dessen Kollimatorspaltvorrichtung in der Wand des Dunkelzimmers befestigt ist, während das Prisma samt Okularrohr frei, ohne Kollimatorrohr, auf einem Tisch im Dunkelzimmer, ca. 1 Meter von der Spaltvorrichtung entfernt aufgestellt war.

Bei meinem großen Farbenmischapparat konnten ziemlich lange Rohre verwendet werden, da die Einstellung der verschiedenen Wellenlängen durch Drehung des Prismas bei konstanter Stellung der Spalten und Rohre erfolgt.

Zu erwähnen ist endlich, daß man, wo man recht reine Lichter braucht, zweckmäßig stets vor den Kollimatorspalt ein Lichtfilter vorschaltet, das möglichst viel von den gerade nicht erwünschten anderen Lichtarten beseitigt. Die Wirkung solcher Filter ist sehr beträchtlich, sie beseitigt vor allem auch das unvermeidliche diffuse Licht im Apparat, das durch Reflexionen entsteht; man kann dann auch größere Spaltweiten verwenden, als wenn man ohne Filter arbeitet. Ausgeschlossen bleibt die Einschaltung von Filtern in solchen Fällen, in denen die verschiedenen Portionen eines und desselben Spektrums verglichen werden sollen.

II. Farbenmischung.

Von den Methoden der Farbenmischung werden hier nur die der sogenannten additiven Mischung behandelt, die der subtraktiven dagegen unberücksichtigt gelassen. Auch von den ersteren kann in dem verfügbaren Raum nur das Allgemeine und Grundsätzliche besprochen werden; genauere Beschreibung auch nur der wichtigsten Farbenmischapparate in ihren Einzelheiten, Arbeitsbedingungen und Fehlerquellen muß unterbleiben, ich gehe vielmehr auf die einzelnen Konstruktionen nur insoweit ein, als sie etwas

ihnen Eigentümliches und vom Standpunkt der Methodik Interessierendes bieten. Eine Anleitung zum Arbeiten mit jedem der erwähnten Apparate würde den Rahmen dieser Darstellung bei weitem übersteigen.

1. Farbenkreisel.

(Vgl. hierzu auch das oben S. 32f über intermittierende Lichtreizung Gesagte.)

Die Kreiselmischung hat für viele Versuche große Vorzüge vor allen anderen Mischungsmethoden und wird daher auch in vielseitiger Weise verwendet.

Bei den Kreiseln mit Handbetrieb ist eine mehrfache Übersetzung nötig, um genügend große Ge-

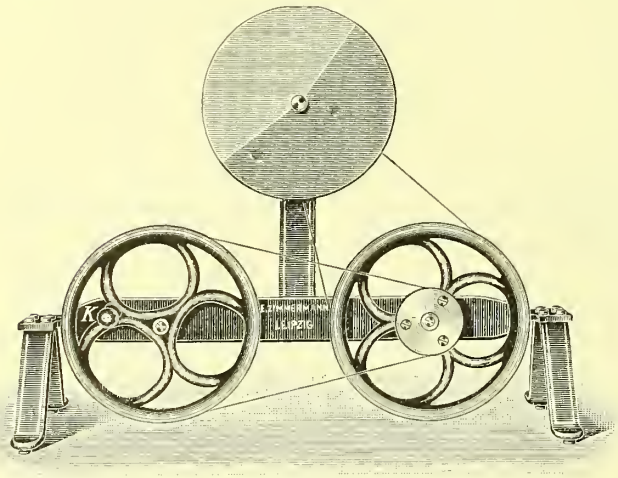


Fig. 31a.

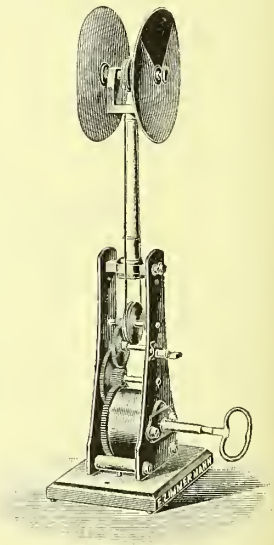


Fig. 31b.

Zwei Farbenkreisel von E. Zimmermann (Leipzig).

schwindigkeit zu erhalten. Seiner soliden und zweckmäßigen Konstruktion wegen ist der von Universitätsmechaniker Rothe in Leipzig verfertigte Kreisel sehr verbreitet, weniger der nur für bestimmte Zwecke empfehlenswerte Kreisel mit Tretvorrichtung. Auch E. Zimmermann (Leipzig) liefert gute Kreisel verschiedener Konstruktion. Der Rothesche Kreisel wird jetzt auch mit einem Träger für eine zweite Kreiselachse geliefert, auf welche die Rotheschen Scheiben ebenfalls passen. Man kann dann beide Kreisel koppeln oder einen (oder auch beide) mit Motorkraft betreiben.

Der Betrieb mit Uhrwerk wird jetzt weniger als früher benutzt, seit die bequemen Elektromotoren zur Verfügung stehen. Nur wo ein ganz konstanter Gang verlangt wird, bleibt das Uhrwerk noch immer das Beste.

Ich habe vielfach einen Kreisel verwendet, der von Herrn W. Oehmke (Berlin, Physiol. Institut) nach meiner Angabe hergestellt worden und recht zweckmäßig ist. Er ist so eingerichtet, daß die Rotheschen Scheiben darauf passen. Die Transmissionsschnur greift entweder an der Hauptachse des Kreisels direkt an, oder an einem Vorgelege, das auf jeder Achse ein großes

und ein kleines Rad trägt, so daß man nach Belieben auf sehr große oder kleine Geschwindigkeiten einstellen kann. Eine Schraube ohne Ende auf der Hauptachse greift in ein Zahnrad ein, welches einen verstellbaren Registrierkontakt trägt, um die Umdrehungsfrequenz graphisch registrieren zu lassen. Nach Belieben kann man jede Umdrehung, oder jede zweite, vierte usw. registrieren lassen.

Unbequem ist bei den meisten Kreiseln die Notwendigkeit, zum Verstellen der Sektorbreite jedesmal den Kreisel anhalten zu müssen. Marbe[48–50] hat deshalb von E. Zimmermann (Leipzig) einen während des Ganges verstellbaren Kreisel für Motorbetrieb anfertigen lassen. Neuerdings hat Zimmermann diesen Kreisel wesentlich verbessert, indem die Verstellung der beiden Scheiben gegeneinander durch eine mit Spiralnuten versehene Achse bewirkt wird, die sich in einem Mantelrohr mit Führungsstiften durch eine Stellschraube drehen läßt.

Die horizontal freilaufenden Kreisel, die mit einer Schnur abgezogen werden (wie sie Helmholtz in seiner physiologischen Optik beschreibt und abbildet) werden heute wohl kaum mehr verwendet.

Für besondere Fälle kann man statt der rotierenden Scheibe einen rotierenden Zylinder mit Vorteil verwenden, der wie die Trommel eines Kymographions mit Papier bezogen wird. Klebt man beispielsweise zwei dreieckige farbige Papiere, ein blaues und ein rotes so, wie es Fig. 32 zeigt, aneinander und legt sie um die Trommel derart, daß a mit a′, b mit b′ zur Deckung kommen, und läßt nun den Zylinder rasch um seine Achse rotieren, so kann man sich sämtliche Mischungsabstufungen vom reinen Rot zum reinen Blau nebeneinander veranschaulichen. Bei ähnlicher Mischung einer Farbe mit Weiß oder mit Schwarz zeigen sich die verschiedenen Sättigungs- bezw. Intensitätsabstufungen.

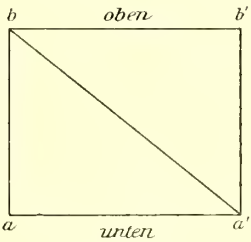


Fig. 32.

Mischt man auf einem Kreisel Rot, Grün und Blau (Violett) in richtigen Verhältnissen, so wird bekanntlich auch im hellen Zimmer nicht Weiß, sondern Grau erzielt. Ein leuchtendes Weiß erzielt v. Kries in einem wirkungsvollen Vorlesungsversuch, indem er im dunklen Saal ein kreisrundes Diaphragma mittels einer Bogenlampe auf die Kreiselscheibe projiziert, so daß gerade nur diese bestrahlt wird und im Kontrast mit der dunklen Umgebung rein weiß erscheint.

Durchsichtige Kreiselscheiben aus Glasstücken oder Gelatine- (bezw. Flexoid-) Scheiben zur Projektion zu verwenden, bietet kaum Vorteile vor den nachstehend beschriebenen anderen Methoden additiver Mischung ohne Kreisel.

Unter Umständen kann die schnelle Oszillation zweier Lichtfilter im Schnittpunkt der Strahlen eines Projektionssystems in Betracht kommen, was technisch leicht zu machen ist und nur kleine Filterstücke verlangt. Bei getrennten Lichtquellen kann auch die partiell belegte Spiegelscheibe verwendet werden, die in meinem Spektralmischapparat die Mischung besorgt. Eine Lichtquelle sendet ihr Licht durch die Scheibe, die Strahlen der anderen werden von den versilberten Sektoren reflektiert. Zwei Qua-

dranten sind versilbert, die anderen 2 durchsichtig. Auch für die objektive Darstellung der Farbenmischung mittels Projektion eignet sich dieses Verfahren.

Ewald[22]) hat neuerdings eine hübsche Methode angegeben, die auf der Umkehrung des Zyklostat-Prinzips beruht und von ihm Zykloskop genannt wird. Dabei können die Farbenscheiben fest sein und ihr optisches Bild wird durch ein Prisma in Rotation versetzt. Näheres siehe in der Originalpublikation.

2. Farbenmischung ohne Farbenkreisel und ohne Spektralapparate.

Ungezählte Methoden gibt es, mittels deren man durch Lichtfilter oder Pigmente gewonnene farbige Lichter mischen kann, ohne den Kreisel zu benutzen. Die meisten lassen sich mit geringen Modifikationen sowohl für sogenannte „subjektive" Beobachtung durch einen einzelnen Beobachter, wie auch für „objektive" Demonstrationen (Projektion in größerem Zuschauerkreis) verwenden. Ich erwähne kurz einige der gebräuchlichsten, und zwar in der für objektive Demonstration geeigneten Form.

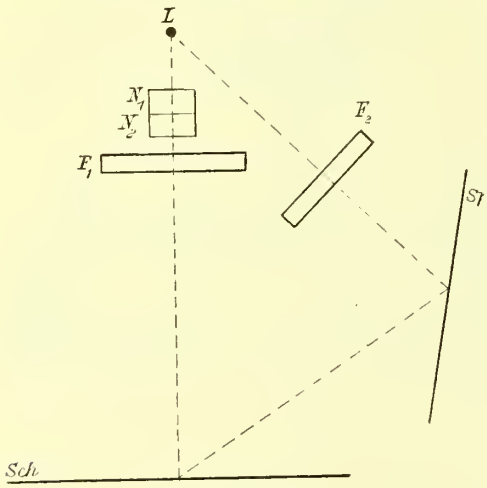


Fig. 33.

1. Zwei Projektionsapparate beleuchten gemeinsam dasselbe Feld. Vor jedem derselben befindet sich ein Lichtfilter. Indem man das Verhältnis der von den beiden Lichtquellen ausgesandten Lichtmengen durch Blenden oder sonstwie reguliert, kann man das Mischungsverhältnis nach Wunsch bestimmen.

2. Vor (oder in der Richtung des Strahlenganges gerechnet: hinter) dem Projektionsobjektiv einer Bogenlampe bringt man die zwei Filter, deren Licht gemischt werden soll, dicht nebeneinander an, so daß ein Teil des Lichtes das eine, ein Teil das andere Filter passieren muß. Indem man die Filter verschiebt, ändert man das Mischungsverhältnis.

3. Das Licht L sendet Strahlen durch das Lichtfilter F^1 auf den Schirm Sch. Zugleich sendet sie Strahlen durch ein anderes Filter F^2 auf den Spiegel Sp, der sie auf Sch reflektiert. Ein Nicolpaar N_1N_2 oder ein Episkotister regulieren die Intensität einer oder beider Komponenten und damit das Mischungsverhältnis (Fig. 33).

4. Zwischen die Beleuchtungslinse B und die Projektionslinsen L_1L_2 wird ein Rahmen geschoben, in dem die beiden Lichtfilter F_1F_2, durch einen undurchsichtigen Streifen getrennt, befestigt sind. Die Projektionslinsen bilden diesen Rahmen auf dem Schirm Sch scharf ab. Ein spitzwinkliges

Prisma P lenkt die Strahlen des einen Bildes so ab, daß es mit dem anderen zur völligen oder partiellen Deckung kommt (Fig. 34).

5. Einige spezielle Vorrichtungen zur Farbenmischung. v. Bezold[7]) hat zur subjektiven Veranschauliehung eines Farbendreieckes ein sehr hübsches Verfahren angegeben, das sich, wie v. Bezold bemerkt, auch zur objektiven Demonstration eignet. Drei unbelegte Glasplatten werden hintereinander in einem dreikantigen prismatischen Kasten angebracht, je unter 45° gegen dessen Achse geneigt; die Ebenen der Scheiben sind gegeneinander um je 120° geneigt. In den Kasten vom einen Ende hineinsehend, sieht man also in jeder der Seheiben eine der 3 Kastenseiten gespiegelt. In jede dieser Seitenwände ist nun ein dreieckiges Loch geschnitten, das nach Größe und Lage so beschaffen ist, daß für das beobachtende Auge am Ende des Kastens die 3 Dreiecke sich decken.

Sind die 3 Öffnungen mit geeigneten Farbengläsern hinterlegt, so sieht man die Mischungserscheinungen, zum Beispiel die Mischung von Rot, Grün und Blau zu Weiß. Man kann nun nach v. Bezold jedes der farbigen Dreiecke so abschattieren, daß die Intensität der Farbe in einer Ecke des

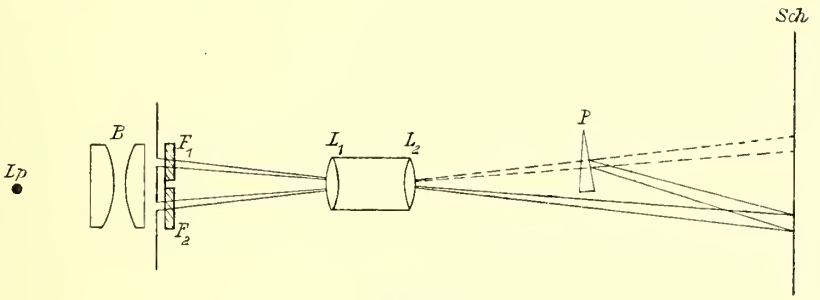


Fig. 34.

Dreiecks ein Maximum hat, an der gegenüberliegenden Seite des Dreiecks die Farbe dagegen ganz ausgelöscht ist. B. erreichte diese Abschattierung durch übereinander gelegte Pauspapierstreifen. Die 3 abschattierten Dreiecke werden dann so angeordnet, daß in dem gemeinsamen Spiegelbilde die eine Ecke rein rot, die zweite grün, die dritte blau ist. Man erhält auf diese Weise ein richtiges Farbendreieck, dessen Mitte weiß ist und das im übrigen alle Farben und Sättigungsgrade zeigt.

Zur Demonstration in der Vorlesung verwende ich seit Jahren folgende der Bezoldschen nachgebildete Vorrichtung: In den Rahmen der Projektionsbogenlampe wird eine Metallplatte eingeschoben, in die 3 Glasplatten eingelassen sind; die Farben sind Rotorange, Grün, Blau-Violett, also so gewählt, daß je zwei davon, hintereinander gehalten, fast undurchlässig für Licht sind.

Metallblenden verdecken diese Glasplatten bis auf gleichseitig-dreieckige Flächen mit 30—40 mm Seitenlänge. Ihre Anordnung zeigt Fig. 35.

Mittels eines Projektionskopfes kann man nun zunächst die drei Farbenfelder nebeneinander gleichzeitig auf eine weiße Wand projizieren. Jetzt setzt man vor (in der Projektionsrichtung: hinter) den Projektionskopf eine

Metallplatte, in die 3 Prismen eingelassen sind, ebenfalls dreieckig und in derselben Anordnung wie in Fig. 35, nur das unterste zu oberst. Jedes der Prismen fängt dann eine der drei Farben ab und wenn der Prismenwinkel im Verhältnis zum Abstand der Abbildungsfläche richtig berechnet ist (bei meiner Einrichtung ein Winkel von ca. 11°, ein Abstand der Linse vom Schirm von ca. 3 m), so fallen die 3 farbigen Dreiecke auf dieselbe Stelle und ergeben, wenn die Farben richtig gewählt sind, ein gutes Weiß. Um von einer völlig scharfen Abbildung unabhängig zu sein, projiziere ich nicht auf eine weiße Wand, sondern auf ein aus Karton geschnittenes weißes Dreieck von etwa 60 cm Höhe, das frei an einem Stativ hängt und etwas kleiner als das reelle Bild der Dreiecke ist. Durch Verdecken je einer der Farbenscheiben oder eines der Prismen kann man die 3 möglichen Binärmischungen: Rot + Grün = Gelb, Rot + Blau = Purpur, Grün + Blau = Blaugrün demonstrieren. Die Helligkeit der Farbenflächen von einer Spitze zur Gegenseite des Dreiecks so abzustufen, wie v. Bezold es im subjektiven Verfahren erreichte, ist mir bis jetzt nicht gelungen, da der Lichtverlust zu groß ist, um die Demonstration im großen Saale noch brauchbar zu machen. Will man das Farbendreieck nicht größer als mit etwa 10 cm Seite haben, so erreicht man den Zweck der Abstufung in ausreichender Weise durch Hinterlegen der Farbengläser mit photographisch abgetönten Glasplatten.

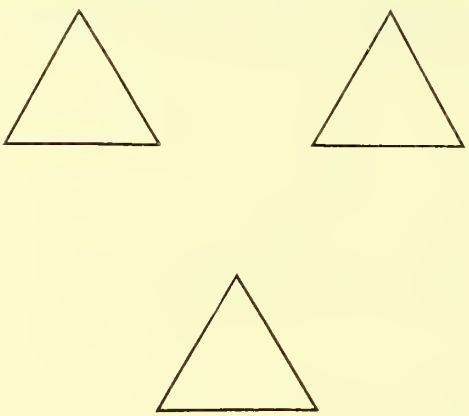


Fig. 35.

Sehr anschaulich ist auch schon der folgende einfache Versuch: man rückt das Kartondreieck etwas näher an die Projektionslinsen heran; dann überlagern sich die 3 Bilder in der Art, daß die reinen Farben in den Ecken, Binärmischungen an den Rändern erscheinen, in der Mitte das glänzend weiße Dreieck.

Herings, speziell zur Diagnose und Demonstration der Farbenblindheit bestimmter Farbenmischapparat[32]) beruht gleichfalls auf der Benutzung unbelegter Spiegel und farbiger Glasplatten. Die Regulierung der Intensität, mit der die einzelnen Komponenten in die Mischung eingehen, wird dadurch erzielt, daß weiße, diffuses Tageslicht reflektierende Platten in wechselndem Winkel gegen das einfallende Licht gestellt werden können und so variable Lichtmengen reflektieren.

Unter dem Namen Heringsches „Fenster[33]) ist eine Vorrichtung bekannt, die zur Farbenmischung auf größeren Flächen und gleichzeitig zur Erzeugung farbiger Schatten brauchbar ist. Aus einem undurchsichtigen Fensterladen eines Dunkelzimmers sind zwei Öffnungen von etlichen Quadratdezimetern Größe ausgeschnitten, die mit farbigen Glasscheiben, Matt- oder Milchglas nach Belieben ganz oder teilweise verdeckt werden können, so daß auf eine im Innern des Zimmers befindliche weiße Fläche Licht von

verschiedener Farbe und Sättigung geworfen werden kann. Ein schattenwerfender Gegenstand zwischen Fenster und weißer Fläche dient dazu, eine Sonderung der Lichter nach dem Prinzip der farbigen Schatten zu bewirken.

Eine einfache, für viele Fälle brauchbare Vorrichtung zur Farbenmischung und zu Mischungsgleichungen hat Meisling[54]) angegeben (Fig. 36). In einem Kasten ist auf der Vorderseite ein Milchglasfenster b b_1 angebracht, das von zwei im Innern des Kastens nebeneinander stehenden farbigen Lichtquellen $a a_1$ (Glühlampen in Gehäuse, mit vorgesetzten Lichtfiltern) beleuchtet wird. Das Fenster ist in der Seitenrichtung verschieblich. Je nachdem es mehr nach rechts oder links geschoben wird, erhöht man den Anteil der einen oder anderen Mischungskomponente. Die untere Hälfte b_1 des Fensters wird von einer dritten Lichtquelle erleuchtet, die in einem lichtdichten Gehäuse k an der Innenseite der Vorderwand des Kastens angebracht wird, sich also mit dieser zusammen verschiebt. Wählt man dieses dritte Licht farblos, das erste und zweite rot und blaugrün, so kann man Bestimmungen der Komplementärmischungen und ähnliches ausführen. Die Intensitätsregulierung der einzelnen Lichter erfolgt durch Blenden.

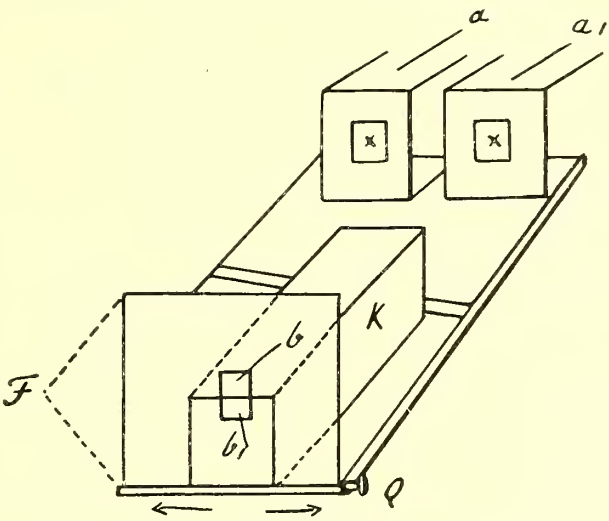


Fig. 36.
Vorrichtung nach Meisling zur Farbenmischung.

Mehrfach hat man auch die durch Zirkularpolarisation erzeugten Farben zu Mischungen benutzt. Alle diese mit Polarisation arbeitenden Apparate, wie der Chibretsche[11]) u. a., geben ungesättigte Farben, die selbst schon Mischfarben sind und deren Mischungserscheinungen daher ebenso wie die vorerwähnten mit Glaslichtern arbeitenden mit einer gewissen Vorsicht zu verwerten sind. Ich nenne hier als Beispiel einer zur objektiven Darstellung geeigneten Einrichtung die von Zoth beschriebene.

Um genaue komplementäre (allerdings nicht homogene) Farbenpaare zu erzeugen und objektiv, auf dem Projektionsschirm, ihre Mischung zu Weiß zu zeigen, benutzt Zoth[73]) das Roscsche Schistoskop, in dem die Zirkularpolarisation einer senkrecht zur Achse geschliffenen Quarzplatte dazu dient, die beiden durch einen Doppelspat erzeugten kreisförmigen Bilder einer Blendenöffnung komplementär zueinander zu färben. Fig. 37 zeigt die Vorrichtung. In dem an den Beleuchtungskopf der Projektionslampe anzusteckenden Rohr R ist mittels des Hebelchens H das Nicolsche Prisma N in einem Umfang von 180° drehbar angebracht. Die jeweilige Stellung kann

an dem Teilhalbkreis T abgelesen werden. Am vorderen Ende des Rohres R sitzt die kreisförmige Blende B von 7 mm Öffnung, auf welche die senkrecht zur Achse geschliffene Bergkristallplatte Q aufgekittet ist.

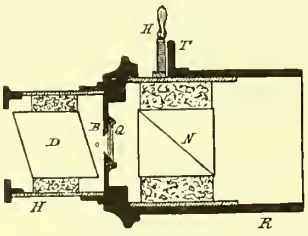


Fig. 37.
(nach Zoth.)

Vor der Blendung kann das in der Hülse H befestigte Doppelspatstück D frei im Kreise herumgedreht werden. Das Doppelbild der Blende B wird durch eine Projektionslinse auf einem Schirm entworfen. Die Vorführung der komplementären Farben kann entweder durch Drehen des Nicol N oder durch Drehen des Doppelspats D bewerkstelligt werden; im letzteren Fall wandert das eine der beiden Kreisfelder um das andere herum, während die komplementären Farbenreihen in beiden ablaufen und das linsenförmige Mittelstück, in dem sich die beiden Kreise überdecken, unverändert weiß bleibt.

3. Mischung von Spektralfarben im subjektiven Verfahren. Farbenmischapparate.

Das einfachste Verfahren zur Mischung von 2 oder mehr spektralen Lichtern besteht darin, daß man bei einem Spektroskop, so wie es oben S. 56ff beschrieben ist, statt eines Kollimatorspaltes deren 2 oder mehr horizontal nebeneinander anbringt. Es werden dann in der Okularspaltebene ebensoviele Spektren entworfen, die sich teilweise überdecken. Im Okularspalt sieht man 2 oder mehr homogene Lichter, je nach der Zahl der sich überdeckenden Spektren, gemischt.

Solche Doppelspalte sind vielfach verwendet worden, ich erinnere nur an die Versuche von Donders, v. Frey und v. Kries u. a. In dem von mir zur Diagnose angeborener und erworbener Farbensinnsstörungen empfohlenen kleinen Farbenmischapparat (Anomaloskop) ist ebenfalls diese Vorrichtung verwendet, und zwar wegen des speziellen Zweckes in Form sog. gekoppelter Spalte, deren Abstand ungeändert bleibt, während der eine Spalt immer nur unter Verengerung des andern erweitert werden kann. Fig. 38 zeigt solche Spalte. Die äußeren Spaltbacken ae und dh stehen fest, die inneren, bf und cg dagegen, die vom Zwischenstück bcgf gebildet werden, sind verstellbar, indem das ganze Zwischenstück durch eine Mikrometerschraube horizontal verschoben wird. Die Summe beider Spaltweiten bleibt stets dieselbe.

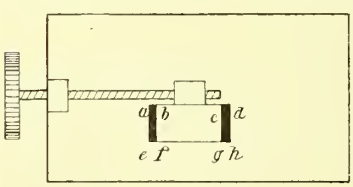


Fig. 38.
Doppelspalt für spektrale Farbenmischung.

Soll sowohl der Abstand der beiden Spalte, wie die Breite jedes derselben geändert werden können, so wird die Vorrichtung weit komplizierter, da dann der Abstand der beiden äußeren Spaltbacken verstellbar sein muß. Außer den beiden hierzu nötigen Schrauben bedarf es einer dritten, die die Breite des Zwischenstücks ändert. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß das Stück statt aus einer festen Platte aus zwei scharnierartig miteinander

verbundenen Platten besteht. Fig. 39 stellt einen Horizontalschnitt durch ein solches Spaltpaar dar; a und d sind die äußeren Spaltbacken, b und c die inneren, deren Abstand durch Verstellen der in e, f und g scharnierartig eingelenkten Metallplatten ef und eg reguliert wird.

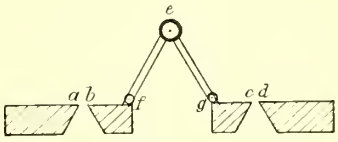


Fig. 39.

Eine andere Vorrichtung zeigt Fig. 40 in schematischer Flächenansicht. Die Schrauben S_1 und S_2 bewegen die äußeren Spaltbacken, S_3 die inneren, und zwar letzteres dadurch, daß ein spitzwinkliger Keil zwischen die beiden Hälften des Zwischenstückes eingetrieben wird. Noch verschiedene andere Mechanismen sind zum gleichen Zweck verwendbar.

In den meisten Fällen wünscht man neben das mit dem Binärgemisch erfüllte Feld ein zweites zu stellen, das entweder mit einem homogenen Licht, oder ebenfalls mit einem Gemisch erfüllt ist. Wo die Lichtquelle für beide Spaltsysteme gemeinsam sein soll, läßt man die Strahlen für das Mischlicht und das Vergleichslicht durch dieselben Linsen und dasselbe Prisma gehen, so daß in der Ebene des Okularspaltes zwei übereinander stehende Spektren entstehen. Da man diese nicht gleichzeitig durch das enge Okularloch sehen kann, so wird ein sog. Zwillingsprisma eingeschoben, das aus zwei spitzwinkligen, mit ihren Basen zusammenstoßenden Prismen (aus einem Stück geschliffen) besteht. Die brechenden Kanten liegen horizontal. Die beiden Spektren werden einander zugebrochen und das am Okular beobachtende Auge sieht die untere Hälfte des Zwillingsprismas mit dem einen, die obere mit dem anderen Spektrallicht erleuchtet. Die beiden Lichter stoßen an der horizontalen stumpfwinkligen Prismenkante scharf begrenzt aneinander. Bei gleicher Farbe und Helligkeit der beiden Lichter verschwindet die Trennungslinie fast vollständig.

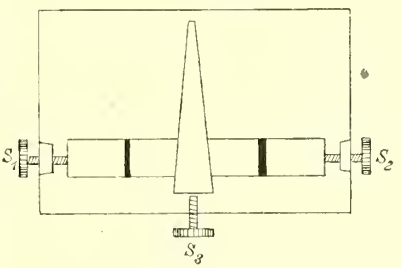


Fig. 40.

Auch das Prinzip des Lummer-Brodhunschen Würfels (s. oben S. 26) eignet sich sehr, um zwei mit spektralem Licht erfüllte Felder in scharfer Linie aneinander stoßen zu lassen.

Helmholtz wendete die eine Kante eines dreiseitigen Prismas dem Okularrohr zu und ließ zwei getrennte Lichtquellen ihr Licht durch das Prisma entsenden, wie es Fig. 41 zeigt. Das am Okularspalt S beobachtende Auge sieht die Prismenkante scharf, sieht ferner die linke Fläche (1) des Prismas mit dem von der Lichtquelle G_1 herkommenden Licht erleuchtet, die rechte (2) mit dem Licht von G_2 erleuchtet.

Bei dem Helmholtzschen Apparat ist es möglich, in jedem der beiden Kollimatoren C_1 und C_2 Lichter von 2 verschiedenen Wellenlängen auf das Prisma P fallen zu lassen, also in beiden Feldhälften binäre Mischungen herzustellen. Die Spaltvorrichtungen S_1 und S_2 sind zwar einfache Spalte, aber hinter ihnen befindet sich je ein doppeltbrechender Kalkspat K_1 bzw. K_2.

Liegt der Kalkspat dem Spalt direkt an (wie in der rechten Figurenhälfte), so entsteht bei S nur ein einfaches Bild des Spaltes S_1 (entworfen

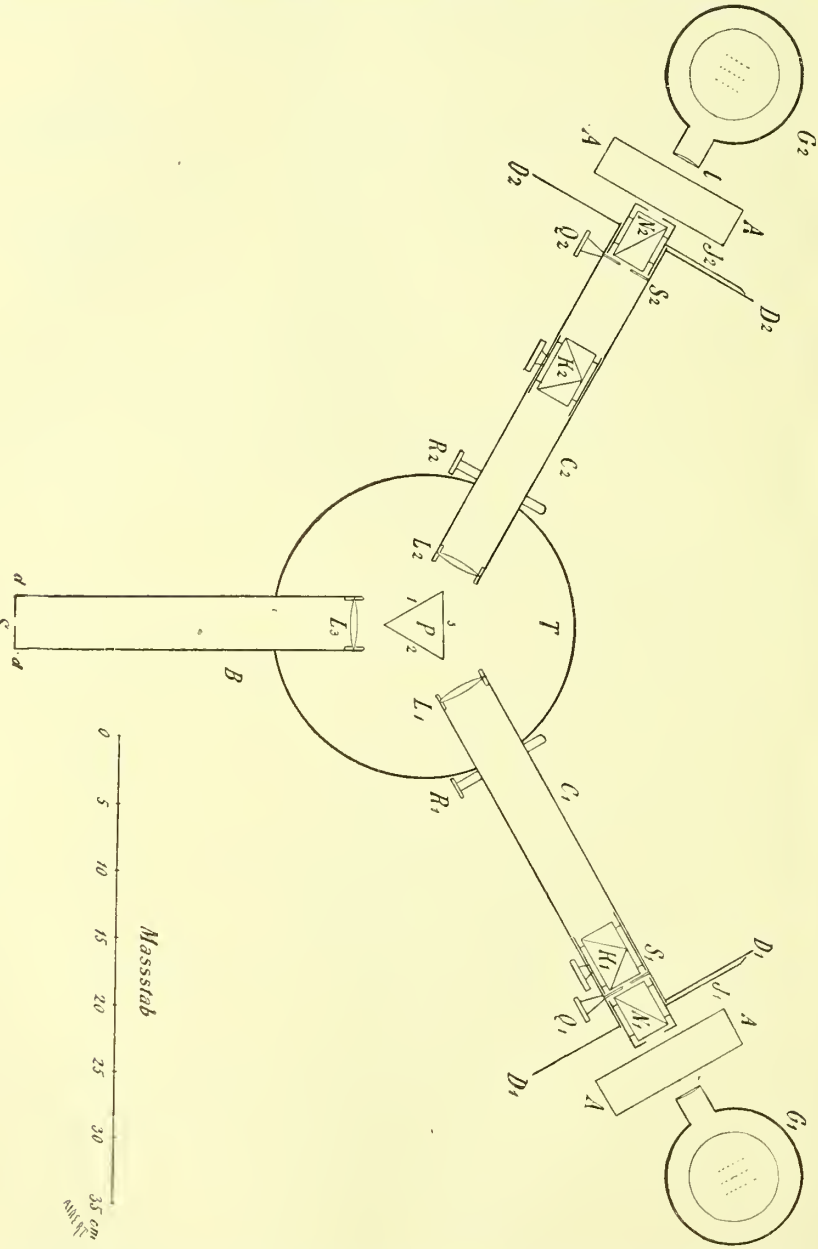


Fig. 41.
Spektrophotometer (Farbenmischapparat) nach Helmholtz, schematisch.

durch die Linsen L_1 und L_3). Wird K dagegen weiter ins Kollimatorrohr hineingeschoben (wie in der linken Bildhälfte), so entstehen in der Ebene

von S (dd) zwei Bilder des mit homogenem Liehte erleuchtet gedaehten Spaltes S_2. Ist S_2 mit gemisehtem Licht erleuchtet, so entstehen in der Ebene dd zwei gegeneinander verschobene Spektren.

Das Vorrücken des Doppelspates wirkt also so, wie wenn bei S_2 zwei Spalte nebeneinander lägen. Je größer der Abstand zwischen K_2 und S_2 wird, desto größer wird die Verschiebung der beiden Spektren im Okular, desto weiter liegen also die bei S gemisehten Lichter im Spektrum auseinander.

Da die beiden dureh K gespaltenen Strahlenbüsehel senkrecht aufeinander polarisiert sind, kann man das Mengenverhältnis, in dem die beiden Liehter bei S gemischt werden, sehr einfach durch ein Nicolsehes Prisma (N_1 bezw. N_2) regulieren, während man durch Änderung der Spaltweiten die Gesamtintensität des Gemisches variiert.

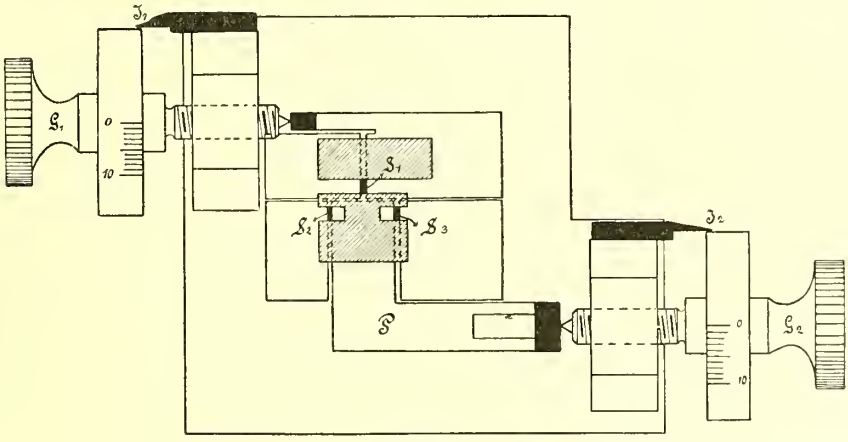


Fig. 42.
Spaltvorrichtung am Farbenmischapparat (Anomaloskop) nach Nagel.

Diese sehr zweckmäßige und theoretisch einfache Konstruktion gestattet ein bequemes Einstellen von Mischungsgleichungen. Auf die leider auch nicht fehlenden Schattenseiten der Einrichtung kann hier nicht eingegangen werden. Erwähnt sei nur, daß die beiden Spektren, die einem Kollimator entstammen, im allgemeinen nieht genau in dieselbe Ebene fallen, was bei quantitativen Versuchen Störungen bewirken kann.

Über einige Vorsichtsmaßregeln, die beim Arbeiten mit dem Helmholtzschen Farbenmischapparat zu beaehten sind, vgl. v. Kries und Nagel [39]).

Als einen für diagnostische Zwecke jetzt öfters benutzten Apparat erwähne ich das von mir[66]) angegebene Instrument, einen kleinen Spektralfarbenmischapparat („Anomaloskop"), den Fr. Schmidt und Haensch (Berlin) in zwei Modellen liefern. Es dient dazu, ein binäres Gemiseh zweier Lichter mit einem homogenen in Gleichung zu bringen. Die Spalteinrichtung ist ähnlich der Dondersschen, nur in technischer Hinsicht durch Verwendung von „Spaltentlastungsvorrichtungen" (s. oben S. 15) wesentlich vervollkommnet. Fig. 42 zeigt den Spaltapparat von der Fläehe, S_1 ist der Spalt für das

homogene Vergleichslicht, S_2 und S_3 sind gekoppelte Spalte für Lichtmischung, deren Weite eine stets konstante Summe beträgt. S_2 und S_3 sind gegeneinander nicht verstellbar, und auch S_1 ist nicht gegen die anderen Spalten verstellbar.

Bei dem einfacheren Modell I, das hauptsächlich zur Diagnose angeborener Farbensinnsstörungen dient, ist sowohl das Kollimatorrohr wie das Okularrohr in fester Verbindung mit dem Mittelteil des Instruments, das den geradsichtigen Prismenkörper enthält. In dem kreisförmigen Gesichtsfeld ist die eine Feldhälfte stets vom Spalt S_1 aus mit dem Licht der Natriumlinie 598 $\mu\mu$ erfüllt, die Spalten S_2 und S_3 liefern das Licht der Lithiumlinie 670 bzw. der Thalliumlinie 535. Da zwischen einem Gemisch dieser beiden Lichter und dem Natriumlicht auf fovealem Feld jeder Beobachter eine vollständige Gleichung erzielen kann, kann man sehr leicht die 3 Typen der Trichromaten: normal, protanomal, deuteranomal an ihren Einstellungen unterscheiden. Der Beobachter stellt das Mischungsverhältnis mit Hilfe des Schraubengriffs G_2 so ein, daß ihm die Mischung mit dem Natriumlicht gleichfarbig aussieht. Am Spalt S_1 stellt man (Fig. 42) gleichzeitig durch Drehen des Griffs G_1 die Helligkeit des Natriumlichtes so ein, daß wahre Gleichung entsteht.

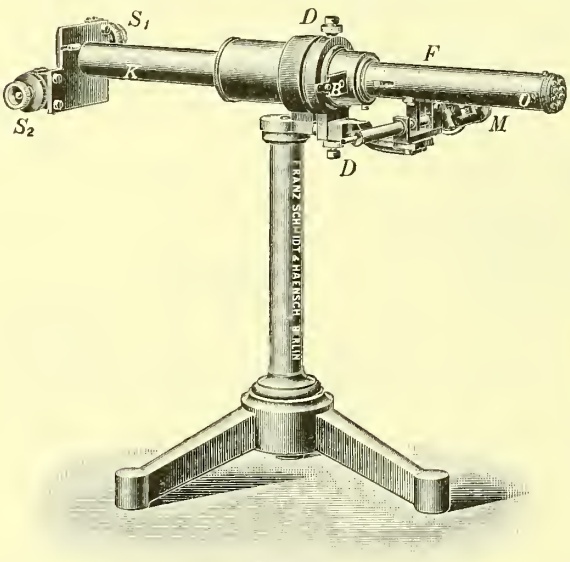


Fig. 43.
Anomaloskop nach Nagel, Modell II.

Durch Anschläge ist dafür gesorgt, daß G_1 und G_2 nicht mehr als eine Umdrehung machen können. Bei der einen Anschlagstellung von G_2 ist S_2 geschlossen, S_3 ganz offen und das Licht in der zugehörigen Feldhälfte rein rot; am andern Anschlag erhält man das Grün rein. Man kann somit auch vom Dichromaten Gleichungen zwischen homogenem Gelb mit homogenem Rot oder Grün einstellen lassen, und dabei die beiden Typen, Protanopen und Deuteranopen, sehr scharf unterscheiden.

Die Beschränkung auf die 3 fest gegebenen Lichter Rot, Grün und Gelb hatte für die Konstruktion des Apparates den Vorteil, daß das Instrument erstens nicht so teuer wurde, wie andere Farbenmischapparate, zweitens aber, — das war die Hauptabsicht, — daß der Apparat auch für den Ungeübten leicht zu handhaben ist und durch Unkenntnis nichts daran ruiniert werden kann.

Über das Modell II, das eine vielseitige Verwendung gestattet, sei nur erwähnt, daß bei ihm das Okularrohr verstellbar ist, so daß alle 3 Lichter

gleichzeitig im selben Sinne im Spektrum verschoben werden können und sämtliche Farben des Spektrums sichtbar gemacht werden können. Fig. 43 zeigt dieses Modell. Bei Modell I fehlt die mit den Buchstaben DM bezeichnete Einrichtung.

Nach völlig anderem Prinzip als bei den bisher genannten Apparaten erfolgt die Farbenmischung bei meinem von Fr. Schmidt und Haensch gebauten großen Farbenmischapparat, der dazu bestimmt ist, Gemische von 2 oder 3 homogenen Lichtern mit einem homogenen Vergleichslicht oder mit gemischtem weißem Licht vergleichen zu können. Die 4 Spaltvorrichtungen sind je an einem besonderen Kollimatorrohr angebracht, und erhalten, wie oben S. 4 erwähnt, alle ihr Licht von einer einzigen leuchtenden Fläche aus. Für jeden Kollimator ist ein um die vertikale Achse drehbarer Prismenkörper mit konstanter Deviation vorhanden. Das Okularrohr liegt in der Verlängerung eines der 3 Mischungskollimatoren. Zwischen den beiden Rohren befinden sich außer dem Prismenkörper 2 runde Spiegelglasplatten, die einzelne versilberte Sektoren tragen, im übrigen aber durchsichtig sind. Die Scheiben können durch einen Elektromotor um horizontale Achsen schnell gedreht werden. Befinden sich die unbelegten Sektoren beider Scheiben vor der hinteren Öffnung des Okularrohres, so sieht man durch dieses das aus dem ersten Kollimator stammende Licht; schiebt sich der Silbersektor der ersten Scheibe vor, so wird das Licht aus dem zweiten Kollimator ins Okularrohr gespiegelt; schiebt sich der Silbersektor der zweiten Scheibe vor, so sieht man das Licht des dritten Kollimators. Bei rascher Rotation mischen sich diese 3 Lichter natürlich. Durch Weglassung einer der Spiegelscheiben kann man die für gewöhnlich benutzten Binärmischungen erhalten.

Das Instrument läßt sich auch als Flimmerphotometer für spektrale Lichter verwenden.

Spektralfarbenmischung ohne komplizierte Apparate für Unterrichtszwecke ermöglicht eine von v. Kries[12]) angegebene Versuchsanordnung, die speziell dazu dient, im physiologischen Praktikum eine Anschauung vom Prinzip der Farbenmischung an einer leicht verständlichen Einrichtung zu geben. Fig. 44 zeigt die Anordnung in schematischer Darstellung. Statt eines Doppelspaltes sind zwei annähernd linienförmige Lichtquellen verwendet, nämlich zwei vertikalstehende Glühlampen L_1 und L_2 von Röhrenform*), in denen die beiden Schenkel des Kohlenfadens dicht beieinander liegen, so daß jede Lampe als einheitliche spaltförmige Lichtquelle wirkt. Die Lampen sind auf einer Schlittenbahn verschieblich angebracht. Pr ist das Prisma eines gewöhnlichen Bunsenschen Spektralapparates, aus dem der Spaltansatz des Kollimatorrohrs entfernt ist. Die Kollimatorlinse wird durch eine Linse von 0,25 Dioptrien, C, ersetzt. An Stelle des Okulars ist ein Rohr mit einem Okularspalt OS (gebracht). In einem Abstande von 4 m von der Kollimatorlinse befindet sich eine horizontale Schlittenbahn mit Millimeterskala, in der zwei Schieber gleiten. Jeder der Schieber trägt eine der gewöhnlichen Edisonfassungen und ist für die Aufnahme einer der in

*) Lampen mit einfachem linearem Glühfaden wären natürlich noch vorzuziehen; doch stellt sich deren Herstellung für höhere Spannungen, 110 bezw. 220 Volt ziemlich teuer.

Handel gebräuchlichen Röhrenlampen L_1 und L_2 eingerichtet. Die Fassungen werden auf den Schiebern derart angebracht, daß sie eine möglichst weitgehende Annäherung der beiden Lampen gestatten.

Die Objektivlinse O entwirft von den beiden Lampen die reellen Spektra Sp_1 und Sp_2 und der Beobachter, dessen Auge sich hinter dem Okularspalt befindet, sieht die Blende B mit der Mischung der aus den beiden Spektren ausgeschnittenen Lichter erhellt.

Die Regulierung des Intensitätsverhältnisses der beiden Lampen geschieht durch Vorschaltung eines Schieberwiderstandes. Da es lediglich darauf ankommt, das Verhältnis der beiden gemischten Lichter abzustufen, so wird das Verfahren in angenehmer Weise vereinfacht, indem man die beiden der einen und der anderen Lampe vorgeschalteten Widerstände nebeneinander in entgegengesetzter Anordnung anbringt und ihre Schieber miteinander verkoppelt. Auf diese Weise wird bei einer Mittelstellung des

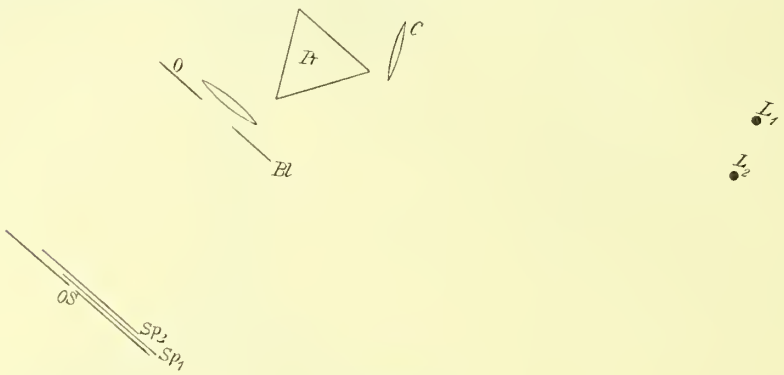


Fig. 44.

Schiebers jeder Lampe der halbe Widerstand vorgeschaltet, während bei den beiden extremen Stellungen je eine Lampe den vollen und die andere gar keinen Widerstand vorgeschaltet hat. Hierdurch wird erreicht, daß der Beobachter durch einen Handgriff das Stärkeverhältnis der beiden in die Mischung eingehenden Lichter von einem bis zum entgegengesetzten Extrem verändert.

Läßt man zunächst den Schieber hin und her bewegen und dabei die ja direkt sichtbaren Lampen betrachten, so ist der Wechsel ihrer Lichtstärken ohne weiteres zu verfolgen und es ist daher auch die Veränderung des Mengenverhältnisses der in die Mischung eingehenden Lichter von der höchsten denkbaren Anschaulichkeit.

Das den Rheostaten tragende Brett enthält außer diesem zwei Steckdosen, an die die beiden Lampen mittels langer Schnüre und der üblichen Stecker angeschlossen werden können. Die beiden Steckdosen sind andererseits mit einer zum Anschluß an die Zentrale bestimmten gegabelten Leitungsschnur in Verbindung gesetzt, so daß die Einsetzung eines Steckers in eine Steckdose der Zentrale für den Betrieb des ganzen Apparates genügt. Dabei ist dann in jede der beiden Zuleitungen einer der beiden Rheostaten, über-

dies in jedem auch noch ein Schalter eingefügt. Die Anbringung der beiden Schalter ist insofern von besonderem Wert, als der Beobachter dadurch in die Lage gesetzt ist, nach Belieben jeden Augenblick die eine oder die andere Lampe auszulöschen und somit von dem vorher gesehenen Gemisch den einen oder anderen Bestandteil für sich zu betrachten.

Die Anordnung so, wie sie beschrieben ist, gestattet zwar beliebige Farbenmischungen, aber nicht die Einstellung von Gleichungen, da das Vergleichslicht fehlt. Über die Art, wie ein solches herzustellen wäre, vgl. die Originalarbeit. Zahlenmäßige Angaben über das Mischungsverhältnis der beiden Lichter ist bei der Art der Intensitätsregulierung natürlich ausgeschlossen. Dagegen ist eine genaue Eichung der Vorrichtung nach Wellenlängen möglich. Man schraubt eine der Glühlampen aus ihrem Gewinde und setzt statt ihrer ein Gewinde ein, das einen in Blech geschnittenen Spalt an der Stelle des Kohlenfadens trägt. Dahinter bringt man monochromatische Flammen und eicht in bekannter Weise.

4. Mischung von Spektralfarben im objektiven Verfahren.

Die objektive Darstellung von Spektralmischungen, die vor allem zur Demonstration vor größerem Auditorium benutzt wird, kann sich in den Methoden eng an das subjektive Verfahren anschließen.

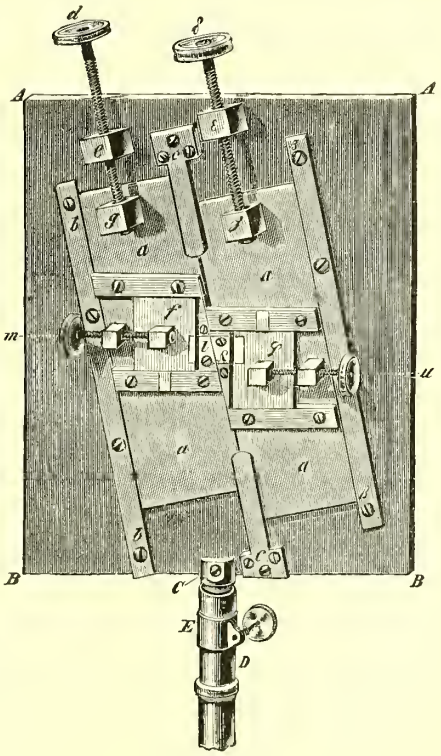


Fig. 45.

Man braucht nur bei dem oben beschriebenen Verfahren mit Doppelspalt oder Doppelspat die Linsen so zu wählen, daß das Bild des Kollimatorspaltes statt in natürlicher Größe in der Ebene des Okularspaltes in mehr oder weniger starker Vergrößerung auf einer weißen Fläche entworfen wird, die senkrecht und frei sichtbar im Zimmer angebracht ist.

Diese einfache Demonstration ist sehr anschaulich. Durch abwechselndes Zudecken der beiden Spalte zeigt man die beiden Spektra einzeln, deren teilweise Überdeckung die Mischung erzielt. Ich pflege danach den weißen Schirm zu ersetzen durch einen vertikalen, etwa 1 cm breiten Streifen aus weißem Karton oder weißgestrichenem Holz, den man in den Ort der beiden sich überdeckenden Spektra bringt, um die Mischfarbe abzufangen, ohne daß man durch den Einfluß der im ganzen sichtbaren Spektra gestört wird.

Wünschenswert ist bei diesen Versuchen die Verstellbarkeit der beiden Spalte gegeneinander und unabhängige Spaltweitenregulierung für jeden

der beiden. Man benutzt also entweder das Helmholtzsche Doppelspatverfahren (wozu man freilich einen recht großen Doppelspat braucht und sehr helle Bogenlampen; Regulierung des Mischungsverhältnisses mit Nicols) oder, einfacher und besser die Helmholtzsche Doppelspaltvorrichtung, die in Fig. 45 wiedergegeben ist und bezüglich deren Konstruktion auf die Beschreibung des Autors verwiesen sei.

Da die Einstellung bestimmter Farbenmischungen immer etwas mühsam und zeitraubend bleibt, ziehe ich für Demonstrationszwecke die Verwendung von festen aus Karton oder Blech geschnittenen Spaltpaaren vor, bei denen der Abstand der beiden Spalte voneinander und ihre Weite von vornherein so gewählt ist, daß man einige gewünschte Hauptversuche zeigen kann, z. B. Weißmischungen, Purpur usw. Ich schneide die Spalte, so wie Fig. 46a zeigt, in der Höhe gegeneinander versetzt, wie es auch Zoth[73]) tut. Fängt man die gemischten Lichter auf vertikalen weißen Streifen auf, so sieht man das Gemisch, z. B. Weiß, oben und unten von den beiden isolierten Komponenten, etwa Indigo und Gelb, begrenzt (Fig. 46b).

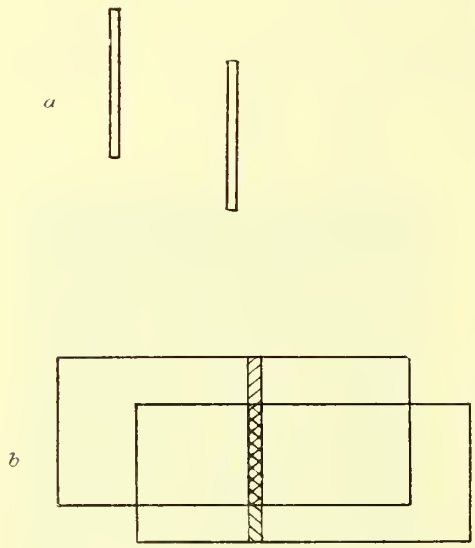


Fig. 46.

Zoth (l. c.) hat den einen der beiden Spalte fest, aber in der Weite verstellbar gemacht und verwendet für den zweiten Spalt einen vertikal verschiebbaren Metallstreifen, in dem eine Anzahl Spalte, alle gleich weit, eingeschnitten sind, mit sukzessive steigendem Seitenabstand von dem festen ersten Spalt. Man kann also schnell das gewünschte Lichterpaar einstellen.

Ich habe die Zothsche Einrichtung nicht selbst erprobt, doch scheint sie mir sehr zweckmäßig, namentlich für den Fall, daß man nicht immer den gleichen Projektionsabstand verwenden kann, wie ich es bei meinen festen Spalten voraussetze.

Bei dem beschriebenen Verfahren erhält man keine großen Flächen, die die Mischfarbe zeigen, da ja der senkrechte weiße Streifen ein Stück aus jedem der beiden Spektren herausschneidet und somit an seinem linken Rande von Licht anderer Wellenlänge bestrahlt wird als am rechten. Soll dies nicht merkbar werden, so muß der Streifen schon recht schmal im Verhältnis zur Gesamtbreite des Spektrums sein.

Folgende Methoden vermeiden diesen Fehler. Vielfach benutzt wird die von Helmholtz[30]) angegebene Anordnung, die aus Fig. 47 ersichtlich ist. Sonnenlicht oder Licht einer starken Bogenlampe fällt durch einen Spalt parallelstrahlig auf das Prisma P. Die Linse L_1 entwirft ein spektralzerstreutes Spaltbild auf dem Schirm S_1, der 2 Spalten γ_1 und γ_2 trägt und

wie Fig. 45 konstruiert ist. D ist ein quadratisches oder rundes Diaphragma, das seinerseits durch die Linse L_2 auf dem weißen Projektionsschirm S_2 abgebildet wird (δ_1 δ_2). Dieses Bild erscheint in der Mischfarbe der beiden durch die Spalte γ_1 und γ_2 durchgelassenen Strahlenarten. Durch abwechselndes Verschließen dieser beiden Spalte kann man die beiden Mischungskomponenten zeigen. Um sie beide gleichzeitig zu zeigen, bringt

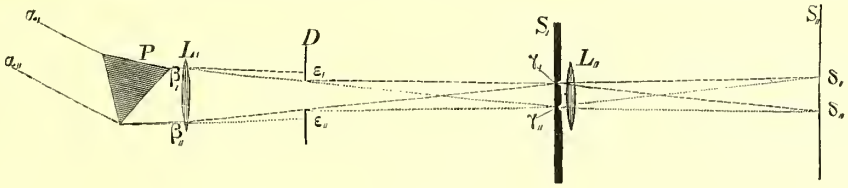


Fig. 47.

man nach einem von v. Kries u. a. benutzten Verfahren vor einen der Spalte ein kleines Prisma mit wenigen Grad brechendem Winkel, wodurch das Bild in zwei verschiedenfarbige gespalten wird.

Eine zweckmäßige Versuchsanordnung ist auch die von Samojloff[63]) angegebene, die aus Fig. 48 verständlich wird. Der Kondensor K einer Bogenlampe läßt leicht konvergente Strahlen auf das Prisma P fallen. Durch die Linse L wird die dem Kondensator am nächsten liegende Fläche des Prismas auf den Schirm S in vergrößertem Maßstab projiziert, wie man ein Diapositiv projiziert, also in stark vergrößertem Maßstab. Bei richtiger scharfer Einwirkung darf das Bild an den vertikalen Rändern kaum gefärbt erscheinen. Bei C liegt die Abbildung der Bogenlampenkohle durch das Prisma in ein kleines Spektrum auseinander gezogen. Bringt man hier eine undurchsichtige Platte mit vertikalem Spalt an, so gelangt annähernd homogenes Licht zum Schirm S und auf diesem leuchtet eine große Fläche in farbigem Licht. Verschiebt man den Spalt bei C quer zum Strahlengang, so kann man in besonders schöner Weise die reinen Farben des Spektrums auf großer Fläche isoliert zeigen.

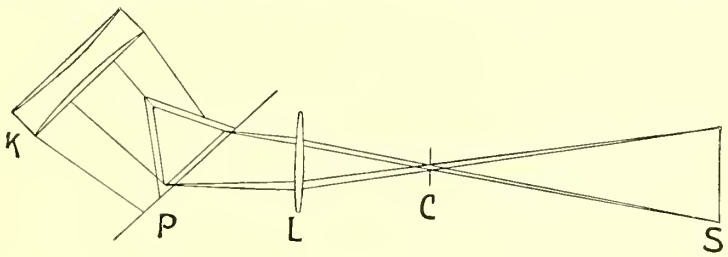


Fig. 48.

Ein Doppelspalt bei C ermöglicht die Herstellung von Mischungen auf großem Feld. Die Analyse der Mischfarbe kann in der Weise geschehen, daß man einen undurchsichtigen Gegenstand zwischen C und S stellt und farbige Schatten erzeugt. Auch kann man wieder durch ein spitzwinkliges Prisma die beiden Farbenfelder einer Binärmischung so gegeneinander ver-

schieben, daß sie sich nun im mittleren Teil decken und mischen und rechts und links die reinen Komponenten sichtbar werden.

Hübsch ist auch folgender von Samojloff angegebener Versuch: Wenn das Rechteck scharf eingestellt ist und ganz weiß erscheint, wird in die Strecke CS eine auf der Achse eines Motors aufgesetzte Pappscheibe mit radial ausgeschnittenen Spalten hineingebracht. Die radialen Spalten erscheinen auf dem Schirm als schmale Spektren. Man erhält also gewissermaßen eine Kreiselscheibe mit spektralen Farben. Läßt man nun die Scheibe sich drehen, so mischen sich die spektralen Speicher und man sieht auf dem schwarzen Grunde als Resultat der Mischung einen grauen Streifen.

Fig 49.

Erwähnt sei noch ein anderes von Helmholtz (Phys. Opt. S. 352) angegebenes Verfahren, das den Vorzug einfachster Anordnung hat. An Stelle eines Doppelspaltes wird ein V-förmiger Spalt (wie in Fig. 49) verwendet, dessen Abbildung zwei Spektren ergibt, die sich in einem dreieckigen Felde decken und mischen.

III. Versuche zur Duplizitätstheorie, Purkinjesches Phänomen.

Das Purkinjesche Phänomen läßt sich in unzähligen Formen demonstrieren und untersuchen. Folgende sind die Versuchsanordnungen, die ich in Vorlesungen und Kursen verwende.

Auf einem Brett sind zwei große Papierbogen von nicht glänzendem Papier befestigt, ein leuchtend roter und ein blauer, und zwar möglichst große Stücke. Das Brett ist in einem großen gut verdunkelbaren Zimmer an der Wand angebracht und kann von einer Argand- oder Petroleumlampe beleuchtet werden, die nach der Zuschauerseite abgedeckt ist. Bei voller Beleuchtung muß das Rot deutlich heller aussehen als das Blau. Wird nun die Beleuchtung durch Kleinstellen der Lampe oder Einschiebung eines Episkotister $\left(\text{Verdunklung auf } \frac{1}{100} \text{ bis } \frac{1}{150}\right)$ bedeutend herabgesetzt, so erscheint für den gut dunkeladaptierten Beobachter das Rot fast schwarz, das Blau hellbläulichgrau. Besonders instruktiv ist mehrmaliger schneller Wechsel der Beleuchtungsstärke. Man zeigt so, daß das Phänomen weder bloß von der Beleuchtungsintensität noch bloß vom Adaptationszustand abhängt.

Das Fehlen des Phänomens im stäbchenfreien Fovealbezirk zeigt man (wie Lummer[46]) für Vorlesungsversuche empfiehlt) recht anschaulich, indem man das Licht so schwach macht, daß das Rot wesentlich dunkler als das Blau aussieht, aber noch deutlich farbig ist. Dann verdeckt man den größten Teil der Farbenfelder durch einen schwarzen Vorhang, der nur in der Mitte ein Loch hat, das für den Zuschauer einen Gesichtswinkel von höchstens 2^0 zeigt und zur Hälfte auf das Rot, zur Hälfte aufs Blau fällt. Fixiert man dieses kleine Feld, so erscheint das Rot heller als das Blau.

Man darf die Helligkeit nicht so weit herabsetzen, daß das Rot schwarz aussieht, weil es sonst vielen Personen nicht gelingt, das Feld foveal zu fixieren. Die rote Farbe muß noch die Fixation auf das Feld ziehen.

Man kann auch zu gleichem Zweck im Projektionsapparat große rote und blaue (bezw. grüne) Felder, durch Farbengläser erzeugt, nebeneinander projizieren, und die Verdunklung durch Nicolpaar oder Episkotister bewirken. Eine an geeigneter Stelle eingesehaltete Irisblende oder Einsteckblende gestattet, die Größe des Gesamtfeldes plötzlich auf foveale Größe herabzusetzen.

In Kursen mit nicht zu vielen Teilnehmern kann man eine sehr anschauliche Demonstration anschließen, die messende Untersuchung der Dämmerungswerte am Farbenkreisel. Man läßt eine Farbenscheibe, z. B. Blaugrün rotieren, auf die man ein kleineres Scheibenpaar, schwarz und weiß, in verschiedenem Sektorenverhältnis misehbar, aufschiebt. Man läßt den Kreisel rotieren und stellt beim Scheine einer ganz schwachen Lampe die Gleichung ein. Der Beobachter muß hinreichend dunkeladaptiert sein, um die farbige Scheibe farblos sehen und so die Helligkeitsgleichung mit dem Schwarz-Weißgemisch einstellen zu können. Steigert man nun plötzlich die Gesamtbeleuchtung für einige Sekunden bedeutend, so daß die Farben leuchtend sichtbar werden, so sieht man z. B. bei Orange als Vergleichslicht das eingestellte Grau fast schwarz neben dem hellen Orange. Umgekehrt bei Blau und Grün muß das im Dämmerlicht gleichhelle Grau bei starker Beleuchtung zu hell aussehen. Durch Ausmessen der Sektorengrößen im Schwarz-Weißgemisch bekommt man einen zahlenmäßigen Ausdruck für die „Dämmerungswerte".

Schwieriger und namentlich zeitraubender ist die Bestimmung der Dämmerungswerte spektraler Lichter an einem Spektralphotometer. Dieses muß die Möglichkeit geben, 2 homogene Lichter unmittelbar nebeneinander zu zeigen, von denen das eine, der Wellenlänge nach konstant bleibende, das Vergleichslicht, in seiner Intensität in großem Umfang variierbar sein muß. Mit diesem Licht werden sukzessive die einzelnen Lichter des Spektrums verglichen. Die Gesamthelligkeit beider Felder muß so gering und die Dunkeladaptation eine so gute sein (mindestens $^1/_2$ stündig), daß das Gesichtsfeld völlig farblos aussieht. Da man nicht gern sehr schwache Lichtquellen verwenden wird, und die Spalte nicht allzueng genommen werden dürfen, setzt man am besten die Gesamthelligkeit beider Feldhälften proportional mittels eines Episkotisters oder gekreuzter Nicols so weit herunter, bis die Bedingungen des reinen Dämmerungssehens erreicht sind. Zwischen je 2 Beobachtungen wird das Beobachtungsauge am besten geschlossen, um die Adaptation möglichst konstant zu halten. Besondere Vorsicht gegen Zerstörung der Adaptation ist natürlich nötig, wenn nach jeder Einstellung der Gehilfe zur Ablesung der Einstellung das Zimmer erhellen muß.

Am Helmholtzschen Spektrophotometer stellen auch Ungeübte die Dämmerungswerte oft recht gut ein, so daß man ein deutliches Bild von der Helligkeitsverteilung im Spektrum beim Dämmerungssehen bekommt. Auf diese Weise, wie übrigens auch am Farbenkreisel, kann man leicht demonstrieren, daß die Dämmerungswerte für die verschiedenen Typen des Farbensinns keine wesentlichen Unterschiede zeigen.

Es sei noch bemerkt, daß bei Untersuchungen am Spektrophotometer mit sehr geringen Lichtstärken besonders zweckmäßig von nur einer Lichtquelle Gebrauch gemacht wird, auch wenn der Apparat, wie es z. B. bei dem Helmholtzschen der Fall ist, eigentlich für 2 Lichtquellen eingerichtet ist. Man ersetzt dann die beiden Lampen durch Spiegelplatten oder weiße Platten, die gemeinsam von einer einzigen Lichtquelle beleuchtet werden. Man wird dadurch von etwaigen in 2 Lampen ungleich stark vor sich gehenden Intensitätsschwankungen unabhängig (vergl. Schaternikoff[64]).

Was hier über die Bestimmung der Dämmerungswerte am Kreisel und Spektrum gesagt wurde, gibt zugleich die Art und Weise an, wie man für den Totalfarbenblinden die relative Helligkeit der einzelnen Farben bestimmt. Nur braucht hier die Gesamtintensität lange nicht so gering zu sein, wie bei Bestimmung der Dämmerungswerte. Man kann sie 20 bis 40 Mal höher wählen.

Eine etwas schwierige Aufgabe ist die Messung des fovealen Bezirks, in dem das Purkinjesche Phänomen gänzlich fehlt. Weitaus am leichtesten gelingt das noch beim Deuteranopen (Grünblinden) als Beobachter, weil für diesen Lichter von sehr ungleichem Dämmerungswert foveal vollständige Gleichung geben, nämlich Rot und Gelbgrün. Über die Methodik feinerer Messungen vergl. v. Kries und Nagel[40]). Eine einfache Vorrichtung, mittels deren man auch als normaler Trichromat wenigstens annähernde Messungen machen kann, ist die folgende: In einem Rahmen aus Holz oder Metall bringt man eine Kartonplatte von Visitenkarten- oder Postkartengröße leicht verschieblich an. Dieser Karton wird mit tiefrotem Papier beklebt, auf dem in der Mitte ein rundes Scheibchen weißen Papiers von etwa 3 mm Durchmesser aufgeklebt ist. Dieses läßt man von einem Deuteranopen mit grüner Wasserfarbe anmalen, wobei die Farbe so gemischt sein muß, daß sie bei hellem Lampenlicht für ihn völlige Gleichung mit dem Rot des Grundes ergibt. Für Personen mit normalem Farbensinn sieht dann bei derselben hellen Lampenbeleuchtung der grüne Fleck annähernd gleichhell wie der rote Grund aus, oder ein wenig dunkler. Wenn man nun gute Dunkeladaptation eintreten läßt, am besten durch etwa einstündiges Verbinden des einen Auges, und die rote Karte in einem dunklen Winkel des Zimmers betrachtet, so sieht sowohl der Trichromat wie der Deuteranop sogleich, daß das Grün bedeutend heller als der Grund und stark weißlich aussieht, sobald man etwas daran vorbeifixiert. Um die Größe des Bezirks, in dem dies der Fall ist, zu messen, spannt man über den Rahmen einen feinen schwarzen Faden, in dessen Mitte man einen nicht zu kleinen Knoten gemacht hat. Dieser soll als Fixierpunkt dienen und wird so angebracht, daß beim Hin- und Herschieben des roten Blattes die Mitte des grünen Fleckes sich unter dem Knoten durchschiebt. Fixiert man diesen aus etwa 50 cm Abstand mit dem dunkeladaptierten Auge bei schwachem Licht, so bemerkt man leicht, daß der grüne Fleck, wenn er unter oder dicht neben dem Fixierpunkt steht, gleichhell wie der Grund oder etwas dunkler ist, während er bei seitlicher Verschiebung um etwa $^1/_2$ cm zunächst auf der Außenseite einen hellen, weißlichen Saum bekommt und bei weiterer Verschiebung ganz weißlich wird.

Eine gewisse Schwierigkeit liegt in dem Abpassen der richtigen Beleuchtungsstärke, bei der die Fixation des schwarzen Knotens sicher möglich

sein muß und doch die Dunkeladaptation möglichst wenig zerstört werden darf. Die Grenze für das Weißlichwerden ist um so schärfer, je länger man den Lichtabschluß vom Auge durchgeführt hatte.

IV. Farbengleichungen; Mischungsgleichungen.

Über die Methodik der Herstellung von Gleichungen farbig erscheinender einfacher und gemischter Lichter läßt sich Allgemeines nicht leicht sagen, da hierbei von Fall zu Fall verschieden verfahren werden muß. Ich beschränke mich daher darauf, einige Bemerkungen über diejenigen Gleichungseinstellungen zu machen, die zu Demonstrations- und Unterrichtszwecken, sowie für die praktische Diagnose der einzelnen Farbensysteme von Bedeutung sind. Die gesamte Diagnostik der Farbensinnsstörungen ist hier unberücksichtigt geblieben. Von den zu diagnostischen Zwecken konstruierten Apparaten habe ich auch im Literaturverzeichnis nur diejenigen aufgenommen, die auch zu anderen Untersuchungen vielfach verwendet werden können, oder bei denen die wissenschaftliche Erforschung des Farbensinns geradezu im Vordergrunde steht. Im Text sind diese größtenteils schon weiter oben genannt worden.

1. Dichromatengleichungen.

a) Am Farbenkreisel. Bei der Einstellung der für Dichromaten charakteristischen Gleichungen am Kreisel muß man sich gegenwärtig halten, daß viele, wo nicht alle Dichromaten nur beim Sehen auf relativ kleinem Gesichtsfeld einen streng dichromatischen Farbensinn haben, während sich bei Feldern von 6 und mehr Grad Winkelgröße eine kompliziertere Art des Sehens einstellt. Berücksichtigt man das nicht, so kann man die Enttäuschung erleben, daß Personen, die man auf andere Art als Dichromaten diagnostiziert hat, es ablehnen, irgend eine Gleichung zwischen Blaugrün und Purpur oder zwischen Grün und Braun anzuerkennen. Bei der üblichen Größe der Kreiselscheiben sollte man also den dichromatischen Beobachter mindestens 3 m entfernt von der Scheibe placieren, besser noch ferner. Bei kleinerem Abstand lassen sich die meisten nur auf die Angabe „ungefähr gleich“ ein.

Von den Verwechselungsgleichungen nenne ich als besonders instruktiv zunächst die Gleichung: Blaugrün = Rot + Blau. Wählt man, was zu empfehlen, ein dunkles Blau, so wird man meist dem Blaugrün etwas Schwarz beimengen müssen, um volle Gleichung zu bekommen. Natürlich wird die Gleichung von Protanopen und Deuteranopen verschieden eingestellt. Hat man die Gleichung von einem Deuteranopen einstellen lassen, verdunkelt dann das Zimmer stark und läßt die Gleichung von dem gut dunkeladaptierten Deuteranopen wieder betrachten, so stimmt sie längst nicht mehr, das Grün erscheint ihm (ebenso wie einem mitbeobachtenden dunkeladaptierten Normalen) zu hell, — die überzeugendste Demonstration des Purkinjeschen Phänomens an Lichtern, die sowohl im Tagesschen, wie im Dämmersehen wahre, nicht heterochrome, Gleichung für den Dichromaten ergeben (v. Kries[41]).

Rot + Blau = Schwarz + Weiß, und Blaugrün + Gelbgrün = Schwarz + Weiß sind die Gleichungen zur Veranschaulichung des neutralen Punktes im Grün und des farblos aussehenden Purpur.

Rot oder Orange = Schwarz + Gelb veranschaulicht die langwellige „Endstrecke" im Spektrum. Meist muß auf einer der beiden Seiten etwas Weiß zugesetzt werden, um gleiche Sättigung zu erzielen. Die Helligkeit aber soll möglichst nur durch den Schwarzsektor reguliert werden. Diese Gleichung bringt den Unterschied zwischen Protanopen und Deuteranopen deutlich zum Ausdruck: das Schwarz-Gelb-Gemisch, das der Deuteranop dem Rot gleich sieht, erscheint auch für den Normalen annähernd gleich hell wie das Rot. Der Protanop dagegen nimmt wesentlich mehr Schwarz in die Mischung.

b) Am Spektroskop. Dieselben Gleichungen wie am Kreisel sind auch hier am instruktivsten. Dazu kommt noch die Aufsuchung des neutralen Punktes in genauerer Weise. Am besten ist es, wenn man die eine Hälfte des Beobachtungsfeldes mit gespiegeltem Tageslicht weiß erleuchten kann. Mit künstlichem Licht geht dies schwer, da alle Arten zu wenig weiß sind. Man kann sich so helfen, daß man erst aus zwei Komplementärfarben, z. B. rot und blaugrün, ein für das normale Auge reines Weiß mischt und dann dieses nach den Angaben des Dichromaten so ändert, bis es für ihn weder bläulich noch gelblich aussieht. Oder man verwendet, wie es Arthur König tat, als weiße Lichtquelle Auerlicht, vor das man ein blaues Glas und eine dünne Eosinlösung als Lichtfilter bringt. Die Lösung und das blaue Glas kann man ein für allemal durch Vergleich mit Schnee- oder Wolkenlicht ausprobieren. Zu diesem Vergleichslicht läßt man dann das „neutrale" homogene Licht suchen, indem man die andere Feldhälfte sukzessive mit den einzelnen Lichtern des Spektrums erfüllt. Man erhält so recht genaue Angaben, genauer, als wenn man ohne Verwendung eines weißen Vergleichslichtes einfach das farblos erscheinende homogene Licht suchen läßt.

Auch bei der Herstellung von Weißmischungen durch den Normalen ist übrigens die Genauigkeit der Einstellung immer größer mit als ohne Vergleichslicht; der Unterschied zwischen beiden Methoden ist hier noch viel größer als beim Dichromaten. Freilich ist eben das gespiegelte Licht weißer Wolken oder einer Schneefläche auch nur mit Vorbehalt als reines, wirkliches Weiß zu rechnen. Auf die schwierige Technik der Weißmischungen gehe ich nicht näher ein, vgl. hierüber die Spezialarbeiten.

Bestimmungen der Eichwerte (v. Kries) für ein dichromatisches System.

Die Eigenschaften eines dichromatischen Farbensystems kommen bekanntlich am charakteristischsten in den sogenannten Eichwertkurven zum Ausdruck, wie sie König, v. Kries u. a. vielfach bestimmt haben. Ohne auf ihre theoretische Bedeutung näher einzugehen, gebe ich hier die Grundzüge der dabei in Betracht kommenden Methodik an.

Man bedarf dazu eines Spektralfarben-Mischapparates, der es gestattet, Gleichungen zwischen jedem beliebigen homogenen Licht und einem Binärgemisch einzustellen, dessen beide Komponenten in den beiden „Endstrecken" (König) des Dichromatenspektrums liegen. Zur Gewinnung der Eichwerte eines der beiden „rot-grünblinden" Typen, Protanopen oder Deuteranopen, würde man also etwa ein Rot von der Wellenlänge 650 $\mu\mu$ mit einem Indigoblau von 450 $\mu\mu$ mischen. Wie die Mischung erfolgt und die Mengen-

verhältnisse der beiden Komponenten im Gemisch berechnet werden, hängt von der Konstruktion des Apparates*) ab und kann hier unberücksichtigt bleiben.

Nehmen wir ein Gemisch von 650 und 450 $\mu\mu$ an, mit dem die eine Hälfte des Beobachtungsfeldes erfüllt werden kann. Man erleuchtet zunächst die andere Hälfte des Feldes mit Rot von 680 $\mu\mu$. Mit diesem Lichte gibt das Licht von 650 ohne weiteres bei geeigneter Intensität eine wahre Gleichung, ohne daß von dem blauen Licht auch nur eine Spur zugesetzt werden müßte. Der „Blauwert" oder Kaltwert (K-wert) nach Donders' Bezeichnung ist also Null. Der „Rotwert" (Warmwert oder W-wert) läßt sich in willkürlicher Einheit ausdrücken durch die Spaltweite, die dem Licht von 650 gegeben werden muß, um volle Gleichung mit dem Licht 680 zu geben. Nehmen wir an, diese Spaltweite werde = 15 abgelesen.

Nun nimmt man ein zweites homogenes Licht von der Wellenlänge 670 $\mu\mu$, ohne die Spaltweite zu ändern. Dies gibt mit 650 natürlich ebenfalls Gleichung, doch muß auf der Seite der Eichlichter jetzt die Spaltweite erhöht werden, nehmen wir an, auf 22. Nun folgt ein homogenes Licht von 660, dann 650, 640 usf. Alle diese geben für den Deuteranopen Gleichungen mit 650 ohne Blauzusatz, ihr Blauwert ist also noch immer = 0. Dagegen muß die Spaltweite des Eichlichtes 650 immer mehr erhöht werden, bis etwa zu dem homogenen Licht 600. Bei Lichtern unterhalb 600 dagegen muß dessen Spaltweite wieder verkleinert werden. Dies ist der Ausdruck für die Tatsache, daß alle diese Lichter dem Dichromaten gleichfarbig und nur in verschiedener Helligkeit erscheinen, und daß das Helligkeitsmaximum der W-werte etwa bei 600 liegt. Beim Protanopen liegt das Maximum weiter grünwärts.

Wählt man die Wellenlänge des homogenen Lichtes immer niedriger, so kommt man, etwa bei 540 $\mu\mu$, an eine Grenze, wo keine Gleichung mit dem einfachen Eichlicht 650 mehr durch bloße Spaltweitenänderung erzielbar ist. Das Licht 530 $\mu\mu$ z. B. erscheint dem Dichromaten schon deutlich weißlicher, ungesättigt, gegenüber dem nebenanstehenden Eichlicht 650. Dies ist der Ausdruck dafür, daß bereits ein merklicher Blauwert (K-wert) vorhanden ist. Es muß dem Licht von 650 ein gewisser kleiner Zusatz von Blau gegeben werden und man hat von hier an sowohl den W-Wert als den K-Wert zu notieren. Bei Lichtern von 520, 500 usw. sinken dann die W-Werte immer mehr, die K-Werte nehmen immer mehr zu, bis schließlich im Indigoblau etwa bei 460 eine Stelle kommt, wo Gleichung mit 450 allein, ohne Rotzusatz möglich ist, wo also der W-Wert = 0 würde. Weiterhin sinken dann die K-Werte wieder.

Trägt man die gefundenen W- und K-Werte als Ordinaten in einem Koordinatensystem auf, dessen Abszissen die Wellenlänge des homogenen Lichtes vorstellen, so erhält man die bekannten Eichwertkurven.

In methodischer Hinsicht ist zu bemerken, daß solche Einstellungen am besten an Feldern von etwa 2—3° Durchmesser gemacht werden, unter Vermeidung des Eintritts hoher Dunkeladaptation. Für jedes homogene Licht läßt man mehrere Einstellungen der Eichlichter machen, aus denen der

*) Die meisten derartigen Bestimmungen sind mit dem Helmholtzschen Farbenmischapparat von Fr. Schmidt u. Haensch ausgeführt worden. Bezüglich der Einzelheiten des Verfahrens verweise ich auf die Abhandlungen von König (gesammelte Abhandlungen und v. Kries[41]) insbesondere auf die Abhandlung Nr. 39.

Mittelwert genommen wird. Bei den angenommenen Verhältnissen würden die Spaltweiten für das rote Eichlicht auf sehr hohe Werte steigen, sobald das homogene Vergleichslicht orange bis gelb ist. Solche hohe Werte, Spaltweiten von 1 mm und mehr, sind nicht einwandfrei; deshalb pflegt man, sobald die Spaltweiten über die zulässige Grenze, $^1/_3$ bis $^1/_2$ mm, gehen, die Spaltweite des homogenen Vergleichslichtes um ein bestimmtes Maß, etwa auf $^1/_4$ herabzusetzen, und dann erst bei den Bestimmungen im Grün, wo die Helligkeit wieder sinkt, auf die ursprüngliche Spaltweite herunterzugehen. Bei der Berechnung und Aufzeichnung der Eichwerte muß natürlich dieser Wechsel in der Spaltweite des Vergleichslichtes berücksichtigt werden.

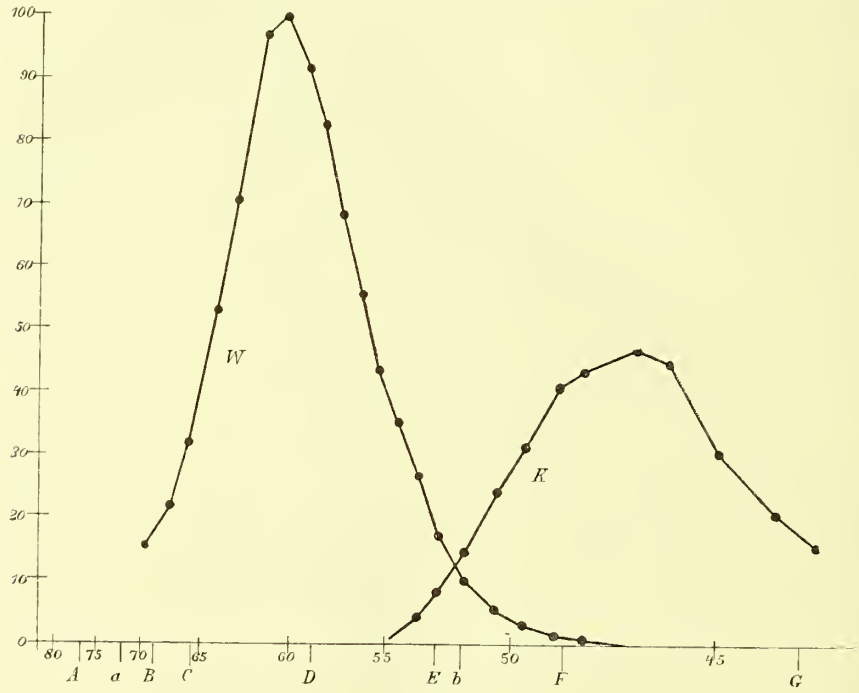


Fig. 50.

Wählt man statt 650 und 450 $\mu\mu$ andere Eichlichter, so ändert das, vorausgesetzt daß diese nur innerhalb der Endstrecken bleiben, an dem Ergebnis nur insofern etwas, als der Maßstab der Kurven ein anderer wird, während deren typischer Verlauf ungeändert bleibt. Der Maßstab ist ja ohnehin willkürlich.

War der Beobachter ein Protanop statt eines Deuteranopen, so wird der Verlauf der W-Kurve ganz anders, das Maximum der W-Werte liegt im Gelbgrün. Die K-Werte dagegen sind wenig oder gar nicht verschieden.

Bei Bestimmung der Eichwerte eines Tritanopen (Violettblinden) verwendet man als Eichlichter wiederum ein Rot von 650—670 $\mu\mu$, und ein Blaugrün von etwa 490 $\mu\mu$.

Als Beispiel einer solchen Eichung gebe ich untenstehende Tabelle nebst Kurven (Fig. 50), gewonnen durch die Beobachtungen eines Deuteranopen am

Dispersionsspektrum des Gaslichtes. Das Gemisch bestand aus den Lichtern 645 $\mu\mu$ und 460,8 $\mu\mu$. Die Beobachtungen erfolgten auf kleinem Feld, ca. 2^0, unter den Bedingungen mäßiger Helladaption. Die Werte sind zur bequemen Eintragung in die Engelmannschen Tafeln (s. S. 45) so umgerechnet, daß der höchste Rotwert = 100 gesetzt ist. W ist die Kurve der Warmwerte (Donders) oder Rotwerte, K die der Kalt- oder Blauwerte.

Tabelle 6.

Beispiel für die Eichwerte eines Deuteranopen (Hellgleichungen).

Wellenlänge	W-Werte	K-Werte	Wellenlänge	W-Werte	K-Werte
670,8 $\mu\mu$	22	—	536 $\mu\mu$	27	4,2
656	32	—	525	17	8
642	53	—	515	10	19
628	71	—	505	5,1	24
615	96	—	496	2,5	32
603	100	—	488	1,1	41
591	91	—	480	0,6	43
581	82	—	469	0,1	47
571	68	—	460,8	—	45
561	55	—	448	—	31
552	43	—	436	—	21
544	35	—			

Auf die Untersuchung der anomalen trichromatischen Systeme gehe ich hier nicht ein. Vgl. hierzu Donders [13, 14, 15], v. Kries [39–42], Nagel.[56]

Als ein wichtiger Punkt von allgemeiner Bedeutung bei der Herstellung spektraler Gleichungen sei dagegen noch erwähnt die Art und Dauer der Beobachtung. Es wird oft sehr darin gefehlt, daß der Beobachter lange Zeit in das Okular hineinstarrt, während er selbst oder ein anderer die Einstellung der Gleichung besorgt. In der hierbei eintretenden lokalen Ermüdung des Auges liegt eine Fehlerquelle, die sich recht störend bemerkbar machen kann, insbesondere bei Untersuchung anomaler Trichromaten, deren Farbensinn durch eine eigentümliche Labilität charakterisiert ist. Man mache es sich daher zur Regel, nicht länger als 5 Sekunden in einer Tour beobachten zu lassen, namentlich wenn es sich um Anomale oder um Fälle erworbener Farbensinnsstörungen handelt. Auch darin wird häufig gefehlt, daß der Beobachter sein Auge zu weit vom Okular entfernt, und daß bei der Beobachtung Brillengläser getragen werden, die meistens nur stören. Nur Presbyopen, Hyperopen höherer und Myopen sehr hoher Grade brauchen bei den üblichen Spektroskopen Korrektion.

Selbstverständlich ist nach dem oben Gesagten, daß man, um „Hellgleichungen“ zu gewinnen, entweder ein Feld von höchstens 2^0 Durchmesser verwenden muß, oder, falls man mit größerem Feld arbeiten will, vor jeder Einstellung für gute Helladaptation zu sorgen hat.

Die Untersuchung peripherer Netzhautteile.

Das Studium der in den extrafovealen Netzhautteilen ausgelösten Gesichtsempfindungen begegnet beträchtlichen Schwierigkeiten und setzt, einige

wenig einfachere Versuche ausgenommen, viel Übung und Geschicklichkeit voraus.

Am leichtesten sind noch in gewisser Beziehung die Bestimmungen der einfachen Lichtempfindlichkeit peripherer Teile; doch spielt auch hierbei die Schwierigkeit des Beobachtens der peripheren Eindrücke eine große Rolle. Weit schwieriger schon ist die Einstellung von Gleichungen auf extrafovealem Gebiet, und zwar nimmt die Genauigkeit und Sicherheit der Einstellungen schon bei wenigen Grad Exzentrizität schnell ab. Immerhin ist es möglich, bei einiger Übung 4^0 bis 5^0 abseits des Fixierpunktes noch Farbengleichungen einzustellen, wenn die zu vergleichenden Felder nicht zu klein sind.

Es ist bei diesen Beobachtungen zu berücksichtigen, daß sich die Funktionsweise der Netzhaut nach Qualität und Empfindlichkeitsgrad mit zunehmender Entfernung von der Fovea schnell ändert. Ein kreisförmiges Sehobjekt, dessen beide Hälften von den zu vergleichenden Lichtern erfüllt sind, und das etwa 5^0 Durchmesser hat, wird daher, wenn sein Mittelpunkt etwa 4^0 abseits der Fovea fällt, auf Netzhautteilen von sehr ungleichmäßigen Erregbarkeitsverhältnissen abgebildet. Die foveawärts gelegenen Teile fallen noch in das Randgebiet des gelben Fleckes, unterliegen also unter Umständen partieller Absorption durch dessen Pigment. An diesen Stellen enthält die Netzhaut auch noch weniger Stäbchen auf der Flächeneinheit, als in den peripheren Teilen, so daß also Lichter von ungleichen Dämmerungswerten in den verschiedenen Teilen der gereizten Netzhaut ungleiche Erregbarkeitsbedingungen antreffen, sobald nicht für sehr gute Helladaptation, mit anderen Worten Ausschaltung der Stäbchenfunktion, gesorgt ist. Solche Umstände können das Einstellen einer wirklichen Gleichung zwischen zwei Feldhälften tatsächlich unmöglich machen.

Peripheriewerte (v. Kries).

Die Bestimmung der Peripheriewerte oder Peripheriehelligkeiten geschieht am besten nach dem Heringschen Verfahren des verschwindenden Fleckes (s. o. S. 59). Eine Fläche von ca. 2 oder mehr Quadratdezimeter Größe (etwa ein weißes Kartonblatt) wird gleichmäßig erleuchtet. In ihrer Mitte ist ein kreisrundes Loch von $^1/_4$ bis 1 cm Durchmesser glattrandig ausgestanzt. Dieses Loch wird mit demjenigen Lichte, dessen Peripheriewert bestimmt werden soll, gleichmäßig erfüllt. Das zur Beobachtung dienende Auge wird dann in solchen Abstand von der weißen Fläche gebracht, daß der farbige Fleck unter dem Gesichtswinkel von 1^0 oder weniger erscheint. Die Blickrichtung wird so gewählt, daß sich der Fleck auf der sogenannten totalfarbenblinden Netzhautzone abbildet; und nun wird entweder die Beleuchtung der weißen Fläche oder die des farbigen Fleckes so reguliert, daß Fleck und Grund gleich hell erscheinen, der Fleck also verschwindet. Führt man diese Bestimmung für verschiedene Lichter aus, so gewinnt man Vergleichswerte für die relativen Helligkeiten dieser Lichter, die Peripheriewerte.

Die genauesten derartigen Bestimmungen sind mit spektraler Erleuchtung des Fleckes ausgeführt worden. Die Versuchsanordnung gestaltet sich dann, wie die Figur 51 zeigt. F ist die weiße Fläche, die von der (nach dem Beobachter abgedeckten) Lichtquelle L gleichmäßig erleuchtet ist.

Hinter der Öffnung Ö befindet sieh die Linse eines Spektralapparates, etwa des v. Kriesschen geradsiehtigen, dessen Spalt Sp_1 von der Lampe L_2 erleuchtet wird. Das Auge A befindet sich dicht vor einer kleinen Metallplatte, in die der enge vertikale Spalt Sp_2 gesehnitten ist. Dieser Spalt muß in der Ebene liegen, in der die Linse des Spektralapparates das Spektrum entwirft. Würde F weggenommen, so würde das Auge die ganze Linse mit einem homogenen Licht erfüllt sehen.

G ist ein Gradbogen, an dem ein Schieber bewegt werden kann, der einen Fixierpunkt für das Auge A trägt. Der Winkel ÖAP muß so gewählt werden, daß Ö sich in der totalfarbenblinden Zone abbildet. Die Regulierung der Helligkeit des Fleckes erfolgt mittels der Mikrometerschraube von Spalt Sp_1, mittels Nieolpaares oder Episkotisters. Reguliert man am Spalt selbst, so kann das vom Beobachter aus mittels Sehnurlaufs geschehen.

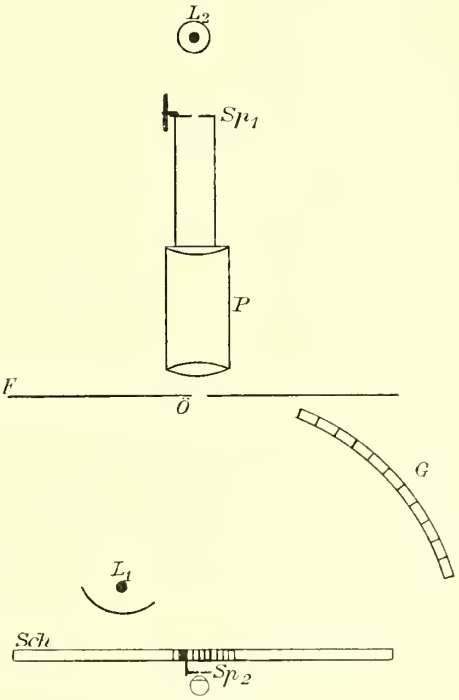


Fig. 51.

Weleher Grad von Exzentrizität nötig ist, läßt sich nicht allgemein angeben, da dies je naeh den übrigen Versuehsbedingungen verschieden ist und unter bestimmten Umständen einzelne Lichter in der Peripherie der Netzhaut ihre Farbigkeit überhaupt nicht verlieren.

Die Wellenlänge des den Fleek erfüllenden Lichtes kann natürlich durch Verschiebung sowohl von Spalt Sp_1 wie von Sp_2 verändert werden. Letzterenfalls muß der Okularspalt auf einer Schiene mit feiner Teilung verstellbar sein; die Teilung wird mittels Metallinien geeieht, indem man vor Sp_1 monochromatische Flammen abbrennt oder eine Quecksilberlampe brennen läßt und mittels Lupe die Linienbilder auf die Mitte des Sp_2 einstellt.

Als wichtigste Fehlerquellen bei der Bestimmung von Peripheriewerten sind zu berücksichtigen:

1. Die lokale Ermüdung der Netzhaut, die in der Periperie sehr schnell vor sich geht. Man darf also nicht längere Zeit auf den Fixierpunkt blicken, sondern wirft den Blick plötzlieh auf diesen Punkt und beobachtet, ob der Fleck in diesem Augenblick zu hell, zu dunkel, oder unsichtbar ist.

2. Der Adaptationszustand. Es ist sehwer, die äußerste Netzhautperipherie in den Zustand voller Helladaptation zu bringen, wie er für Bestimmung reiner Peripheriewerte nötig ist. Gegen den hellen Himmel oder eine helle

Wand zu blicken, genügt nicht, die Peripherie bleibt dabei in mittlerem Adaptationszustand. Wirksamer schon ist ein längerer Gang im Freien auf sonniger Straße. Man kann auch am Fenster oder Balkon die Blickrichtung so wählen, daß gerade die nachher zur Beobachtung des Fleckes dienende seitliche Netzhautpartie vom hellen Himmel bestrahlt wird, während die Fixationsrichtung auf einen dunklen Gegenstand gerichtet sein darf. Die beste Helladaptation erhält man jedoch, wenn man die Pupille mittels Homatropins stark erweitert und nun in der beschriebenen Weise seitlich helles Himmelslicht einfallen läßt. Das ist zwar nicht angenehm, aber ich habe nie eine Schädigung des Auges dabei bemerkt. Natürlich ist direktes Sonnen- und Bogenlicht strengstens zu vermeiden.

Je vollkommener übrigens die Helladaptation ist, desto leichter gelingt die Einstellung auf Verschwinden des Fleckes. Nur mit rein rotem Licht erhält man nie ganz befriedigende Resultate. (Vgl. v. Kries[41a], Angier[2].)

Statt mit spektralem Licht kann man natürlich auch mit farbigen Papieren, Gläsern etc. orientierende Bestimmungen über die Funktion der Netzhautperipherie machen. Man bringt z. B. hinter dem Schirm mit Loch in etwa 30 cm Abstand einen zweiten Schirm an, auf dem verschiedenfarbige Papiere befestigt werden können. Die Beleuchtung des vorderen weißen Schirmes läßt man am besten konstant, die des farbigen Schirmes, der durch das Loch sichtbar wird, wird durch eine variable Lichtquelle, etwa Laterne mit Irisblende, bewirkt. Diese einfache Versuchsanordnung eignet sich besonders, um die bedeutenden Unterschiede der Peripheriewerte zwischen normalen Trichromaten einerseits und Protanopen oder Protanomalen (Rotanomalen) andererseits zu demonstrieren. Dazu wählt man das farbige Papier erst grün, dann gelb, orange, rot.

Einfachere Versuche lassen sich in der Weise anstellen, daß man auf gleichmäßig graues Papier Schnitzel von farbigem Papier legt und diese mit sukzessive steigender Exzentrizität betrachtet, wobei man an einzelnen Farben die Veränderung des Farbentones und unter günstigen Umständen auch das Farbloswerden in der äußersten Peripherie beobachtet. Hat man eine hinreichend große Sammlung von grauen Papieren verschiedenster Helligkeitsstufen zur Verfügung*), so kann man sogar orientierende Peripheriewertbestimmungen machen, indem man für jedes farbige Schnitzel dasjenige Grau aussucht, auf dem es bei peripherer Betrachtung am vollständigsten verschwindet.

Literaturverzeichnis.

1) Aitken, J., Chromomictors. Proc. Edinburgh. **13**, 122, 1885 u. Scient. News I, 1888.

2) Angier, R. P., Vergleichende Bestimmungen der Peripheriewerte des trichromatischen und des deuteranopischen Auges. Zeitschr. f. Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, **37**, 401, 1904.

3) Angier, R. P. u. W. Trendelenburg, Bestimmungen über die Mengenverhältnisse komplementärer Spektralfarben in Weißmischungen. Ebenda, **39**, 284, 1905.

*) Käuflich bei E. Zimmermann, Leipzig, Emilienstr. 21 oder bei Richard Nendel, Verlagsbuchhandlung, Leipzig.

4) Asher, L., Congr. intern. d'Ophthalm. **100,** 157.
5) Beckmann, Zeitschr. f. physik. Chemie. **35,** 1900, 340.
6) v. Bezold, Der Farbenmischer. Catalogue of the spec. Loan Coll. of Scient. Apparatus London. I,139, No. 972, 1876.
7) — Über Herstellung des Farbendreiecks durch wahre Farbenmischung. Annal. d. Physik u. Chemie. NF. **26,** 390, 1885.
8) Boehm, M., Über physiologische Methoden zur Prüfung der Zusammensetzung gemischter Lichter. Zeitschr. f. Sinnesphysiologie. **42,** 155, 1907.
9) Busck, G., Über farbige Lichtfilter. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. **37,** 104, 1905.
10) — Om farvede Lysfiltre. Medd. Finsens medic. Lysinstitut.
11) Chibret, Chromatoscope. Arch. d'Ophthalm. **V,** 181, 1885.
12) — Contribution à l'étude du sens chromatique au moyen du chromatoptomètre. Rev. gén. d'Opht. 1887, 49.
13) Donders, F. C., Over spektroskopen en spektroskopisch onderzoek tot bepaling van den Kleurzin. Kgl. Akad. van Wetensch. 26. Febr. 1881.
14) — Über Spektroskope und spektroskopische Untersuchungen zur Bestimmung des Farbensinns. Klin. Monatsblätter f. Augenheilk. 1881.
15) — Farbengleichungen. Arch. f. (Anat. u.) Physiologie. 1884.
16) Dove, H. W., Über die Methoden aus Komplementärfarben Weiß zu mischen etc. Berliner Monatsbl. S. 70, 1846; Pogg. Annal. **71,** 97.
17) — Eine Methode, Interferenz- und Absorptionsfarben zu mischen. Berliner Monatsbl. 1857. Pogg. Annal. **102.**
18) du Bois, Zeitschr. f. Instrumentenk. **12,** 1891, 165.
19) Edridge-Green, A new spectroscope for the quantitative estimation of defects of colour perception. Brit. med. Assoc. Bristol 1894.
20) Engelmann, Th. W., Tafeln und Tabellen zur Darstellung der Ergebnisse spektroskopischer und spektrophotometrischer Beobachtungen. Leipzig, (Engelmann) 1897.
21) — Das Mikrospektrometer. Zeitschr. f. wiss. Mikroskopie **5,** 289, 1889. — Vgl. auch: H. Siedentopf, Über ein Mikrospektralphotometer nach Engelmann mit Gitterspektrum. Sitz.-Ber. K. Akad. Berlin; 26. Juni 1902.
22) R. Ewald, Über Verwendung rotierender Spiegel zu physiologischen Untersuchungen. I. Das Zykloskop. Zeitschr. f. biolog. Methodik und Technik, 1. 1908.
23) v. Fleischl, Wiedemanns Annal. **38,** 675, 1889.
24) v. Frey, M. u. v. Kries, J., Über die Mischung von Spektralfarben. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1881. 336.
25) Fritsch, G., Beiträge zur Dreifarben-Photographie. Halle (W. Knapp) 1903.
26) Glan, P., Ophthalmospektroskop. Ber. über d. wiss. Instrumente auf d. Berliner Ausstellung 1879. 1881, S. 304.
27) — Über Apparate zur Untersuchung der Farbenempfindungen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie. 24, 307, 1881.
28) Grebe, C., Über Jenenser Lichtfilter. Zeitschr. f. Instrumentenk. 1901, 101.
29) Gullstrand, A., Die Farbe der Macula centralis retinae. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **62,** 1. 1906. (S. 29).
30) v. Helmholtz, H., Handbuch der physiologischen Optik. 2. Aufl. Hamburg, (Leopold Voss) 1896. (Dritte Auflage im Erscheinen.)
31) — Bemerkungen zum Leukoskop. Verhandl. d. Berliner physik. Gesellsch. 1882, 5.
32) Hering, E., Zur Diagnostik der Farbenblindheit. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **36,** 217, 1890.
33) — Eine Vorrichtung zur Farbenmischung, zur Diagnose der Farbenblindheit und zur Untersuchung der Kontrasterscheinungen. Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol. **42,** 119, 1888.
33a) Hess, C., Über den Farbensinn bei indirektem Sehen. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **35,** 1, 1889.
34) Hirschberg, J., Doppelspektroskop zur Analyse der Farbenblindheit. Zentralbl. f. prakt. Augenheilk. 1878.

35) Ketteler, E., Analytisch-synthetischer Mischfarbenapparat. Poggend. Annal. **141,** 604, 1870.

36) Kirschmann, A., Über die Herstellung monochromatischen Lichtes. Philosoph. Studien, herausgeg. von W. Wundt. **6,** 543, 1891.

37) König, A., Über das Leukoskop. Verhandl. d. Berliner physik. Gesellsch. 1882. Wiedemanns Annal. XVII, 190, 1883, u. Zeitschr. f. Instrumentenk. **3.**

38) — Verhandl. d. physik. Gesellsch. z. Berlin. **4,** 50, 1885; **5,** 9, 1886, ferner: Wiedemanns Annalen. **53,** 785, 1894.

39) v. Kries, J. u. W. Nagel, Über den Einfluß von Lichtstärke und Adaptation auf das Sehen des Dichromaten (Grünblinden). Zeitschrift f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **12,** 1.

40) — Weitere Mitteilungen über die funktionelle Sonderstellung des Netzhautzentrums. Ebenda **23,** 161.

41) v. Kries, J., Über Farbensysteme. Ebenda **13,** 241.

41a) — Über die Farbenblindheit der Netzhautperipherie. Ebenda **15,** 247.

42) — Über ein für das physiologische Praktikum geeignetes Verfahren zur Mischung reiner Lichter. Ebenda **43,** 58, 1908.

43) Landolt, H., Methode zur Bestimmung der Rotationsdispersion mit Hilfe von Strahlenfiltern. Ber. deutsch. chem. Gesellsch. 1894, S. 2872.

44) Lippich, Zeitschr. f. Instrumentenkunde. **12,** 340, 1892.

45) Lummer, O. u. Brodhun, E., Über ein neues Spektralphotometer. Zeitschr. f. Instrumentenk. **12,** 132, 1892.

46) — Die Ziele der Leuchttechnik. Elektrotechnische Zeitschrift. **23,** 1902.

47) — Experimentelles über das Sehen im Dunkeln und Hellen. Verhandlungen d. deutschen physik. Gesellschaft. VI. Jahrgang. 1904.

48) Marbe, K., Vorrichtung zur sukzessiven Variierung der Sektoren rotierender Scheiben und zur Ablesung der Sektorenverhältnisse während der Rotation. Zentralbl. f. Physiologie. 1894, Nr. 25.

49) — Bemerkungen zu meinem Rotationsapparat. Ebenda 1895, Nr. 26.

50) — L'Annie psychologique, 5. Annie. 1899, S. 391.

51) Martens, F. F., Verhandl. d. deutschen physikal. Gesellschaft **1,** 280, 1899.

52) Martens, F. F. u. Grünbaum, F., Über eine Neukonstruktion des Königschen Spektralphotometers. Annalen der Physik (IV F) 12 1903.

53) Maxwell, Philosophical Transactions. 1860.

54) Meisling, A., Ein Apparat zur Mischung der Farben und Untersuchung von Farbenblinden. X. Congrès d'Ophtalm. Luzern.

55) Nagel, W. A., Über flüssige Strahlenfilter. Biolog. Zentralblatt **18,** 649, 1898.

56) — Zwei Apparate für die augenärztliche Funktionsprüfung, Adaptometer und kleines Spektralphotometer (Anomaloskop). Zeitschr. f. Augenheilk. **17,** 1907.

57) Osann, Vorrichtung zur Hervorbringung komplementärer Farben etc. Pogg. Annal. **27,** 287 u. 694; **42,** 72.

58) Ostwald, W. u. Luther, R., Hand- und Hilfsbuch zur Ausführung physik.-chemischer Messungen. 2. Aufl. Leipzig (Engelmann) 1902.

59) Parinaud, Appareil pour l'étude des couleurs spectrales. Bull. et Mém. Soc. franç. d'Ophth. 3, 327, 1885.

60) Pulfrich, Zeitschr. f. Instrumentenk. **18,** 52.

61) Rosenstiehl, De l'emploi des disques rotatifs pour l'étude des sensations colorées. Compt. rend. **84,** 1133, 1877 (auch 1878, 1882).

62) Rothe, R., Farbenkreisel. Zentralblatt f. prakt. Augenheilk. 1881, 93. u. Annal. d'Oculitt. **85,** 181.

63) Samojloff, A., Demonstration der objektiven Farbenmischung. Zeitschrift für Sinnesphysiologie **43,** 237, 1908.

64) Schaternikoff, M., Neue Bestimmungen über die Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gas- und des Sonnenlichts. Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. d. Sinnesorgane **29,** 255.

65) F. Schenck, Apparat zur Mischung von Spektralfarben. Sitz.-Ber. Ges. Beförd. Naturwissenschaft in Marburg 11. Dez. 1907.

66) Schmidt u. Haensch, Neuer Helmholtzscher Farbenmischapparat. Zeitschr. f. Instrumentenk. **13**, 200. 1893.

67) Schoeler, Zur Vereinfachung spektroskopischer Apparate für die Untersuchung von Farbenblinden zu ärztlichen Zwecken. Zentralbl. f. prakt. Augenheilk. 1896, 105.

68) Siebeck, R., Über Minimalfeldhelligkeiten. Zeitschr. f. Sinnesphysiologie **41**, 89, 1906.

69) Siedentopf, H., s. o. Nr. 21.

70) Vaughan, C. L. u. A. Boltunow, Über die Verteilung der Empfindlichkeit für farbige Lichter auf der helladaptierten Netzhaut. Zeitschr. f. Sinnesphysiol. **42**, 1, 1907.

71) v. d. Weyde, v. Graefes Arch. f. Ophthalm. **28**, 1.

72) Zettnow, E., Das Kupfer-Chromfilter. Zentralblatt f. Bakteriologie u. Parasitenkunde **4**, 51. 1888.

73) Zoth, O., Eine neue Methode zur Mischung objektiv dargestellter Spektralfarben. Schistoskop für objektive Darstellung etc. Arch. f. d. ges. Physiologie **70**. 1, 1898.

74) Zsigmondy, R., Über Farbgläser für wissenschaftliche und technische Zwecke. Zeitschr. f. Instrumentenk. 1901, 97.

C. Anhang.

Methoden zur Untersuchung objektiver Lichtreizwirkungen im Auge.

Von

W. Nagel.

Versuche am Sehpurpur.

Von den Versuchen, die den Sehpurpur betreffen, erwähne ich hier nur diejenigen, die häufiger ausgeführt werden, speziell zu Demonstrationszwecken oder um überhaupt Sehpurpur zu gewinnen und mit diesem zu experimentieren. Wegen der speziellen Methodik der Versuche, die zum Zweck der Feststellungen über die Eigenschaften des Sehpurpurs, über seine Zersetzungs- bezw. Bleichungsprodukte usw. ausgeführt worden sind, muß auf die Originalarbeiten hauptsächlich von Kühne (Lit. 18 bis 22) großenteils zusammengefaßt in Hermanns Handbuch der Physiologie Bd. III) und von Garten [8; 9] (zusammengefaßt in Graefe-Saemischs Handbuch der gesamten Augenheilkunde, 2. Aufl.) verwiesen werden.

Zur Gewinnung möglichst reiner Sehpurpurlösungen werden die Netzhäute dunkelgehaltener Tiere mit Lösungen von glykocholsaurem Natron extrahiert. Die Konzentrationen von 2—5 %, die Kühne[21]) empfahl, haben sich auch mir am besten bewährt. Kühne, dem die Herstellung farbloser Gallenpräparate zuerst gelungen ist, empfahl folgendes Verfahren zur Herstellung der gebrauchsfertigen Lösung (Hermanns Handbuch S. 265).

„Die zur Extraktion der Netzhäute dienende Gallelösung wird zweckmäßig aus farbloser kristallisierter Ochsengalle erhalten, indem man aus einem Vorrat dosierter alkoholischer Lösung die zum jedesmaligen Gebrauche nötige Menge abmißt und nach vollständiger Entfernung des Alkohols auf dem Wasserbade aus dem festen Rückstande wässrige Lösungen der ge-

wünschten Konzentration, am besten 2—5 % bereitet. Die wässrige, bekanntlich sehr zersetzliche Lösung durch desinfizierende Zusätze vor Fäulnis geschützt vorrätig zu halten, empfiehlt sich nicht."

Hämoglobinfreie Lösungen erhält man ohne weiteres nur von Fischen, Amphibien und Eulen; beim Pferd und Kaninchen nur dann, wenn man die gefäßhaltigen Netzhautstücke wegläßt.

Das ideale Material bilden eigentlich die Eulennetzhäute, besonders die großen, sehr leicht auszulösenden Netzhäute des Waldkauzes (Syrnium aluco) mit ihrem reichen Purpurgehalt. Auch Schleiereulen (Strix) sind sehr geeignet. Wegen der Kosten und der nicht überall leichten Erhältlichkeit der Eulen ist man übrigens meistens doch auf Fische oder Frösche bezw. Kröten angewiesen.

Kräftige, nicht zu kleine Frösche geben, wenn sie eine bis zwei Stunden im Dunkeln gehalten werden, reichlichen Purpur, so daß für die unten zu beschreibende Vorlesungsdemonstration 10, unter günstigen Umständen auch schon 6 Frösche genügen.

Die Enukleation erfolgt sehr schnell mit folgenden 3 Schnitten einer kräftigen Schere: 1) ein Flachschnitt entfernt den Hautwulst über dem Auge; 2) das eine Scherenblatt wird hinter dem Auge in die Orbita eingeschoben und man zerschneidet den Schädel bis fast in die Medianlinie; 3) ein ebensolcher Schnitt wird vor dem Bulbus, mit Schnittrichtung nach dem Hinterkopf ausgeführt. Der Bulbus quillt wie eine Erbse hervor und hängt höchstens noch an ein paar Fäserchen. Mit einer kleineren scharfen Schere wird er nach Abspülen in Kochsalzlösung äquatorial gespalten. In der hinteren Bulbushälfte ist die Sehnervenpapille als durchscheinender Punkt sichtbar; hier greift man mit einer spitzigen Pinzette zu und bringt meistens leicht die ganze Retina als klares Klümpchen heraus, das man flüchtig in frischer Kochsalzlösung abspült.

Um sicherer die Netzhaut als Ganzes herauszubekommen, kann man auch, nach Kühnes Vorschlag, den isolierten Froschbulbus zwischen den Fingern etwas drücken, so daß die dünne Stelle des Augenhintergrundes, in der der Sehnerv austritt, sieh etwas vorwölbt, mit einer flach gebogenen Schere kann man dann den Sehnerveneintritt leicht abknipsen. Natürlich darf man nicht zu stark drüeken, da sonst der ganze Inhalt des Auges aus dem entstehenden Loeh herausspritzt und die äquatoriale Spaltung schleeht gelingt.

Um die Lösung der Netzhaut von der Aderhaut (namentlich bei hellgehaltenen Tieren) zu erleichtern, empfahl Kühne durch Kurarisierung ein Ödem zu erzeugen, das die beiden Häute voneinander löst. Garten empfiehlt die kombinierte Kurare- und Chininvergiftung.

Frösehe, die nicht lange genug im Dunkeln waren oder in schlechtem Zustand sind, geben häufig Netzhäute mit reichlich anhaftendem Pigment, oder die Netzhaut zerreißt. Solche Netzhäute verwirft man am besten ganz.

Die zur Bereitung von Purpurlösung bestimmten Netzhäute bringt man in 2 bis 4 Kubikzentimeter Gallenlösung (s. o.), in der sie 1—2 Stunden bleiben, unter öfterem Umschütteln. Dann wird durch ein ganz kleines Filter (Höhe 1 em) filtriert und, wenn die Lösung sehr klar ist, über Schwefelsäure im Vakuum zur Trockne eingedampft. Meistens fand ich es zweck-

mäßig, die Flüssigkeit vorher in einem $^1/_2$ cm weiten Glasröhrchen zu zentrifugieren und die klare Flüssigkeit sorgfältig mit einer Pipette von dem schwarzen Bodensatz abzuziehen. Zur Trockne eingedampft hält sich die Purpurgallenschicht im Dunkeln lange.

Ich habe die erwähnten Prozeduren meistens bei roter Laterne ausgeführt, Kühne arbeitete bei Natriumlicht. Man kann zu diesem Zweck die oben S. 42 erwähnten sehr hellen Natriumflammen verwenden, die aber die freigelegte Netzhaut doch schon etwas bleichen.

Um in der Vorlesung vor zahlreichen Zuhörern die Purpurbleichung wirksam zu zeigen, empfiehlt sich folgendes von v. Kries erprobtes Verfahren. Aus einer etwa 2 mm dicken Hartgummiplatte ist ein Stück von nebenstehend abgebildeter Form und Größe geschnitten (Fig. 52); beiderseits sind mikroskopische Deckgläschen aufgekittet, so daß zwei kleine oben offene Tröge entstehen. Das Ganze ist in senkrechter Stellung auf einem zylindrischen Hartgummistück befestigt, über welches sich lichtdicht ein Messingdeckel stülpen läßt.

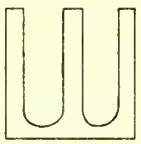


Fig. 52.

Die eingetrocknete Purpurgalle wird mit 6 bis 10 Tropfen Wasser aufgelöst und mittels einer spitzigen Pipette füllt man zunächst die eine Troghälfte. Die Hülse wird darüber gedeckt und nun der immer noch bedeckte Trog mit Hilfe einer Projektionsbogenlampe in starker Vergrößerung auf einer weißen Wand abgebildet. Ist das Bild scharf eingestellt, so wird der Deckel abgenommen und man sieht nun, wenn das Material gut war und richtig behandelt wurde, den Troginhalt leuchtend rot. Er verblaßt gerade so schnell, daß man die Farbenänderung in aller Ruhe beobachten kann. Hat man sich so vor der Demonstration von der Güte des Präparates überzeugt, so füllt man die andere Troghälfte mit der noch ungebleichten Lösung. Projiziert man nachher den Trog zum zweiten Male, so ist der Unterschied zwischen der gebleichten und der zunächst ungebleichten Hälfte außerordentlich deutlich und das Ausbleichen sehr anschaulich.

Möglicherweise würde auch die episkopische Projektion einer auf weißem Grunde liegenden Eulen- oder Katzennetzhaut einen guten Vorlesungsversuch bilden. Isolierte Frosch- und Kaninchennetzhäute (letztere minder geeignet, da sie nur teilweise purpurhaltig sind), werden am besten nach Kühnes Vorschlag auf Porzellanschälchen oder Knöpfe vom Durchmesser des betreffenden Auges gestülpt, damit sie faltenlos liegen. Der Sehnerveneintritt muß umschnitten oder mit einer kleinen Stanze ausgestochen werden.

Über Versuche, die Netzhaut durch Behandlung mit Alaun widerstandsfähiger zu machen, vergl. Kühnes verschiedene Arbeiten[18–22]. Für die Kaninchen- und Katzennetzhaut ist die Alaunbehandlung zweckmäßig, weil die Netzhaut dadurch leichter im ganzen herauszubekommen ist. Trendelenburg[27] fand auch für die Bereitung von Purpurlösungen aus Kaninchenaugen die Härtung der enukleierten, und nach Entfernung der Hornhaut vom Glaskörper befreiten Augen in 4proz. Alaunlösung zweckmäßig. Vorher gute Entblutung des Körpers!

Die Purpurlösungen bleichen, auch wenn sie mit farbloser Gallenlösung hergestellt sind, niemals zu völliger Farblosigkeit aus, es bleibt eine mehr

oder weniger starke Gelbfärbung zurück. Näheres über „Sehgelb“ etc. siehe bei Garten[8; 9].

„Fixierung“ des Sehpurpurs. Es fehlt nicht an Versuchen, den Sehpurpur lichtbeständiger zu machen. Kühne fand, daß im Dunkeln getroeknete Netzhäute langsamer bleichen, als frische. Nach Andogsky[1]) macht Fixierung des Bulbus in 10proz. Formol den Purpur widerstandsfähiger. Ein von R. Stern[26]) angegebenes Verfahren der Behandlung mit $2^1/_2$proz. Lösung von Platinchlorid verfärbt zwar den Purpur zu orange, aber diese Farbe ist dann ziemlich haltbar, wie auch Garten[8; 9]) bestätigt hat. Einen gewissen Wert hat dies Verfahren insofern, als man dadurch Optogramme (s. u.) fixieren und einem größeren Kreise zeigen kann.

Optogramme (Kühne) beruhen auf der lokalen Ausbleichung einzelner Netzhautpartien durch ein auf der Netzhaut entworfenes kontrastreiches Bild. Die Erzeugung von Optogrammen beim Frosch hat Garten durch Verwertung der Tatsache erleichtert, daß Chininvergiftung kurarisierter Frösche die Ablösung der Netzhaut von der Pigmentschicht auch an den Stellen ermöglicht, wo sie vom Licht getroffen war und sonst fest am Pigment zu haften pflegt. Die Chininvergiftung lähmt die phototropisehe Pigmentverschiebung.

Um ein scharfes Bild auf der Netzhaut zu erzeugen, muß natürlich der jeweilige Akkommodationszustand des Auges bekannt sein, damit man das abzubildende Objekt, das möglichst kontrastreieh sein muß, in den richtigen Abstand vom Auge bringen kann. Dieser Abstand ist beim (getöteten) Kaninchen nach Kühne 25 cm, beim kurarisierten Frosch 15 cm. Als Objekt empfiehlt Kühne abwechselnde schwarze und weiße Streifen von gleicher Breite (4—5 cm), etwa schwarze Papierstreifen auf eine durchsichtige Glasscheibe geklebt.

Auch an lebenden Kaninchen können Optogramme erhalten werden, wenn das Tier kurarisiert oder der Bulbus durch Ligaturen festgestellt wird. Durch Atropin wird die Akkommodation gelähmt und gleichzeitig die zweckmäßige Pupillenerweiterung bewirkt. Je nach der Lichtintensität (kein direktes Sonnenlicht!) braucht man eine Exposition von 10 Sekunden bis 7 Minuten. Beim Frosch exponiert man zweckmäßig bei schwachem Licht lange Zeit, $^1/_2$ Stunde bis 2 Stunden.

Die Untersuchung der elektromotorischen Erscheinungen am Auge.

Zum Zweck des Studiums der elektromotorischen Kräfte des Bulbus, des Ruhestroms wie Aktionsstroms, kommen die gleichen Methoden zur Anwendung, wie sie auch bei anderen Organen angezeigt sind. Gut gedämpfte Galvanometer, Kapillar- und Saitenelektrometer werden je nach Umständen gebraucht (vergl. hierüber Bd. II, 3. Abteilung, S. 419ff.). Die meisten bisherigen Messungen sind mittels empfindlicher Spiegelgalvanometer ausgeführt worden. Wo, wie bei den Kaltblütern ein Ruhestrom mit nur sehr geringen und langsamen Schwankungen besteht, ist es leieht, diesen in bekannter Weise zu kompensieren und zu messen. Weit schwieriger ist dies bei Warmblütern, insbesondere Vögeln, bei denen das vollkommen dunkel gehaltene Auge oft rasche und beträchtliche Schwankungen der elektro-

motorischen Kraft zeigt (Himstedt und Nagel[13; 14]). Man muß hier den Kompensationsstrom schnell und bequem ändern können und zur Messung von Aktionsströmen Zeitpunkte abpassen, wo der Spiegel möglichst ruhig steht oder langsam und gleichmäßig in einer Richtung wandert. Vor plötzlichen Änderungen dieser Wanderung ist man natürlich nie sicher und verfolgt daher am besten durch mehrere Minuten hindurch den Gang des Spiegels, eventuell unter photographischer Registrierung, und führt zwischendurch in größeren Pausen die Reizungen durch Licht aus.

In Figur 53 bilde ich nach den Untersuchungen von Himstedt und Nagel den Gang einer solchen Versuchsreihe ab, wobei die Wanderung

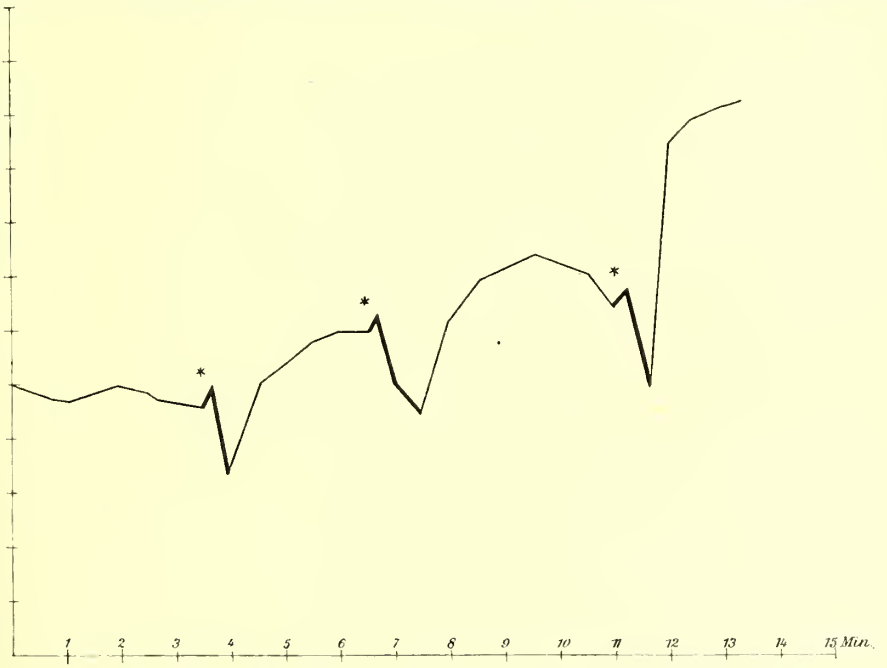


Fig. 53. Aktionsstrom der Netzhaut vom Huhn. Bei * Lichtreiz.

des Galvanometerspiegels im Fernrohr in regelmäßigen Zwischenräumen (alle 5 Sekunden) abgelesen und notiert wurde.

Die Augen von Kaltblütern sind zumeist in enukleiertem Zustande untersucht worden, wo dann die Anlegung der unpolarisierbaren Elektroden (an der Hornhaut außerhalb des Pupillargebietes, und am Sehnervenstumpf oder neben diesem) keinerlei Schwierigkeiten macht. Etwas schwieriger ist die Sache bei Warmblütern, wo Erhaltung der Zirkulation im Auge Vorbedingung für die Auslösung von Aktionsströmen ist. Hier darf natürlich der Sehnerv, der die ernährenden Gefäße für die Netzhaut birgt, nicht durchschnitten werden. Man dringt durch das Dach der Orbita bis zum hinteren Augenpol. Bei Vögeln gelingt das meistens ohne jede Blutung.

Wichtig ist die völlige Immobilisierung des Kopfes und Auges, damit nicht durch Verschiebung der Elektroden Widerstandsänderungen eintreten.

Kurarisierung ist hiefür meistens notwendig. Da rhythmische künstliche Atmung die Gefahr kleinster passiver Bewegung des Kopfes und Auges mit sich bringt, ist es ein glücklicher Umstand, daß man bei Vögeln nach dem von Nagel*) angegebenen Verfahren mit kontinuierlichem Luftstrom künstliche Atmung erhalten kann, insofern lufthaltige Knochen vorhanden sind.

In leichter Äthernarkose legt man einen Humerus bloß, durchschneidet oder durchsägt ihn nahe seinem kubitalen Ende und schiebt einen Gummischlauch auf das zentrale Stück, um nachher von einem kleinen Wasserstrahlgebläse Luft einblasen zu können. Ehe dies geschieht, unterbindet man die über das Ellbogengelenk (auf der Unterseite des Flügels) verlaufende große Vene und spritzt in ihr zentrales Stück Kurare ganz langsam ein, bis die Atmung stillsteht. Dann beginnt man sofort mit der Lufteinblasung, die Luft entweicht durch die Schnabelöffnung ohne weiteres und man kann das Tier leicht stundenlang am Leben erhalten, ohne im geringsten durch Bewegungen gestört zu werden. Erprobt ist diese Methode an Tauben, Hühnern, Eulen, Falken und Bussarden.

Die Kuraremengen, die für Vögel nötig sind, sind recht beträchtlich. Für Hühner braucht man etwa 5—6 cbcm einer Lösung, von der ein Tropfen einen Frosch lähmt (etwa 0,03 bis 0,04 gr Kuraresubstanz).

Literaturverzeichnis.

1) Andogsky, Über das Verhalten des Sehpurpurs bei der Netzhautablösung. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. 1897, 409.

2) du Bois-Reymond, E., Untersuehungen über tierisehe Elektrizität II, 1. 1849.

3) Boll, F., Zur Anatomie und Physiologie der Retina. Sitz.-Ber. Akad. d. Wissensch. Berlin. 1876, 1877.

4) — du Bois-Reymonds Areh. f. Physiol. 1877 u. 1881.

5) Dewar and M'Kendriek, Reeent researehes on the physiol. aetion of light. Nature VIII, 205. 1873.

6) — Philos. Transaet. Roy. Soe. Edinburgh XXVII, 141. 1876.

7) Fuehs, S., Untersuehungen über die im Gefolge der Belichtung auftretenden galvanischen Vorgänge in der Netzhaut und ihren zeitlichen Verlauf. Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol. LVI, 408, 1894 u. LXXXIV 1901.

8) Garten, S., Über die Veränderungen des Sehpurpurs durch Lieht. v. Graefes Areh. f. Ophthalm. LXIII 1906.

9) — Die Veränderungen der Netzhaut durch Lieht. Graefe-Saemisehs Handbueh d. ges. Augenheilk. II. Aufl. 1908.

10) Gotch, Journ. of Physiol. **30,** u. **31.** 1904.

11) de Haas, Lichtprikkels en Retina-stroomen in hun quantitativ Verband. Diss. Leyden, 1903.

12) Hamburger, Staafjesrood in monochromatiseh Lieht. Onderzoek. Utrechtsche Hoogesehol. 3. R. XI, 1, 1889.

13) Himstedt u. Nagel, Über die Einwirkungen der Beequerel- und der Röntgenstrahlen auf d. Auge. Annal. d. Physik. 4. F. IV, 1901.

14) — Versuehe über die Reizwirkung verschiedener Strahlenarten auf Mensehen- und Tieraugen. Festsehrift 50. Reg.-Jubil. Großherzogs v. Baden. 1902.

*) Zentralblatt für Physiologie XIV, 553, 1900.

15) Holmgren, F., Om retinaströmen. Upsala Läkare förenings Förhandl. Nr. 5, 419, 1871.

16) — Über die Retinaströme. Heidelberger Untersuch. III, 278, 1880.

17) Köttgen u. Abelsdorff, Die Arten des Sehpurpurs in der Wirbeltierreihe. Sitz.-Ber. K. Akad. d. Wiss. Berlin 38, 1895, u. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane **12**, 161, 1896.

18) Kühne, W., Zur Photochemie d. Netzhaut. Sitz.-Ber. naturhist. med. Vereins, Heidelberg 5. Jan. 1877.

19) — Vorläufige Mitteilung über optographische Versuche. Zentralbl. f. d. med. Wissensch. 20. Jan. 1877.

20) — Über die Darstellung von Optogrammen im Froschauge. Untersuch. aus d. Heidelberger Institut, I. In diesem Bande noch mehrere andere Arbeiten über Sehpurpur.

21) — Chemische Vorgänge in der Netzhaut. Hermanns Handbuch der Physiologie, Bd. III. 235.

22) Kühne u. Steiner, Über das elektromotorische Verhalten der Netzhaut. Heidelberger Untersuch. III, 327, 1880.

23) Nagel, W., Die Wirkungen des Lichtes auf d. Netzhaut. Nagels Handbuch d. Physiologie d. Menschen III. 1904.

24) — u. Piper, Über die Bleichung des Sehpurpurs durch Lichter von verschiedenen Wellenlängen. Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorg. **39**, 1905.

25) Piper, H., Untersuchungen über das elektromotorische Verhalten der Netzhaut bei Warmblütern. Arch. f. (Anat. u.) Physiol. 1905.

26) Stern, R., Über Sehpurpurfixation. v. Graefes Arch. f. Ophthalm. LXI, 1905.

27) Trendelenburg, W., Quantitative Untersuchungen über die Bleichung d. Sehpurpurs in monochromatischem Licht. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. **37**, 1904.

II.

Raumsinn des Auges. — Augenbewegungen.

Von

F. B. Hofmann in Innsbruck.

(Mit 54 Figuren.)

Einleitung.

Bei der Darstellung der Untersuchungsmethoden des Raumsinns des Auges sind folgende Gesichtspunkte leitend gewesen: Die Anordnung des Stoffes folgt nicht einer streng systematischen Ableitung der Lehre vom Raumsinn, sondern richtet sich hauptsächlich nach der Technik. In der Untersuchungstechnik übereinstimmende Kapitel werden gemeinsam behandelt, solche, welche zwar theoretisch nahe verwandt sind, aber eine gänzlich abweichende Technik erfordern, voneinander getrennt. Theoretische Vorbemerkungen werden nur insoweit eingefügt, als sie für das Verständnis der Untersuchungsmethoden notwendig sind. Wo es wünschenswert schien, wurden jene Elementarversuche besonders hervorgehoben, deren Anstellung zum Eindringen in das Verständnis unerläßlich ist. Im übrigen wird auf Beobachtungen ganz einfacher Art, wie sie auf dem Gebiete des Raumsinnes des Auges häufig vorkommen, Betrachtungen gewisser Zeichnungen u. ä., an der entsprechenden Stelle mit Angabe der Literatur zwar hingewiesen, von einer Reproduktion aller dieser Zeichnungen usf. wurde aber abgesehen. Bei der Beschreibung von Apparaten, die mehrfach abgeändert wurden, ist vor allem Rücksicht genommen auf die zweckmäßigste Modifikation, nicht auf die ursprüngliche Form. Über die historische Entwicklung der Untersuchungstechnik auf diesem Gebiete gewähren ja die klassischen Gesamtdarstellungen von H. v. Helmholtz (Handbuch der physiologischen Optik) und E. Hering (Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges in Hermanns Handbuch der Physiologie Bd. 3) eine ausreichende Übersicht. Diese beiden Werke werden im folgenden kurz als „Helmholtz (O.)“ (die Seitenzahlen stets nach der 2. Auflage) und „Hering (R.)“ zitiert. Die sonst hinter den Autorennamen angeführten kleinen arabischen Ziffern geben die Nummern des Literaturverzeichnisses am Schlusse des Artikels an. In diesem wird natürlich wieder nur die Technik berücksichtigt. Theoretische Abhandlungen ohne technische Angaben werden nur insoweit angeführt, als im Text auf sie Bezug genommen wird.

I. Untersuchung der Sehschärfe.

Den kleinsten Gesichtswinkel, unter welchem zwei feine Punkte oder Linien eben noch gesondert wahrgenommen werden, sah man bis vor kurzem allgemein als das Maß der Feinheit des Raumsinnes des Auges an. Nun

hat aber Hering[42]) gezeigt, daß die Feinheit des Raumsinnes des Auges viel weiter reicht, und daß man mit jener Methode nur eine Fähigkeit des Gesichtssinnes mißt, die er als das „Auflösungsvermögen" des Auges bezeichnet. Das wirkliche Maß für die Feinheit des optischen Raumsinnes ist gegeben durch den Gesichtswinkel des kleinsten Unterschiedes von Lagen, welchen das Auge eben noch zu erkennen vermag. Die Untersuchung des Auflösungsvermögens des Auges und der Unterschiedsempfindlichkeit für Lagen erfordert aber ganz verschiedene Methoden, und daher müssen beide im folgenden streng auseinander gehalten werden. Den eingebürgerten Ausdruck „Sehsehärfe" kann man dabei als bequemen Sammelnamen für das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit für Lagen beibehalten.

a) Das Auflösungsvermögen des Auges.

Fassen wir den Begriff des Auflösungsvermögens des Auges möglichst weit als die Fähigkeit, feine Details wahrzunehmen, so können wir als das Maß des Auflösungsvermögens den kleinsten Gesichtswinkel bezeichnen, unter welchem ein durch seine Helligkeit bzw. seine Farbe von der Umgebung verschiedenes Objekt eben noch erkennbar ist. Die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit von Details wird in erster Linie abhängen von Größe und gegenseitigem Abstand der lichtempfindlichen, isoliert für sich reizbaren Netzhautelemente und von der Schärfe der Netzhautbilder. Für das zentrale Sehen können wir als kleinste, isoliert für sich reizbare Netzhautelemente die Zapfen ansehen. Wenigstens läßt sich auch die sehr feine Unterschiedsempfindlichkeit für Lagen durch diese Annahme sehr wohl erklären (Hering[42])). Die Schärfe der Netzhautbilder ist aber selbst unter den günstigsten Bedingungen keine absolute. Selbst wenn wir von allen größeren Abweichungen vom durchschnittlichen Bau des Auges, die bereits ins Gebiet der Refraktionsanomalien hinüberreichen, absehen, so wird schon in diesem Falle ein leuchtender Punkt auf der Retina des auf ihn eingestellten Auges nicht als solcher, sondern in Form einer kleinen beleuchteten Fläche abgebildet, deren Beleuchtung vom Zentrum gegen die Peripherie zu abnimmt. Hering[41]), S. 440) nannte jenes Zwischengebiet, welches im Netzhautbilde den scharfen Kontur des Außendinges vertritt, das Aberrationsgebiet. Dem Vorhandensein dieses Aberrationsgebietes ist es wesentlich zuzusehreiben, daß das Auflösungsvermögen des Auges so weit hinter der Empfindlichkeit für Lagenuntersehiede zurückbleibt. Wird nämlich auf der Retina das Bild zweier genügend nahe aneinander liegender Lichtpunkte entworfen, so werden die Grenzen der beiderseitigen Aberrationsgebiete teilweise übereinander greifen. Es sei in Figur 1*) XX′ ein Schnitt durch die flach ausgebreitet gedachte Netzhaut, auf der um A und C herum die Bilder zweier leuchtender Punkte liegen. Ist die

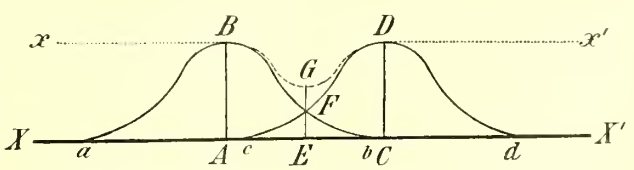


Fig. 1.

*) Man vergl. dazu die Figur 1 bei Lehmann (126), S. 86).

Belichtung der Netzhaut durch jeden einzelnen leuchtenden Außenpunkt an jeder Stelle proportional der geraden Erhebung der Kurven aBb und cDd über XX′, so wird infolge des Übereinandergreifens der beiden Lichtflächen ein mitten zwischen A und C liegender Punkt E mit der Intensität EG belichtet, und die Verteilung des Lichtes auf der Netzhaut beim Betrachten beider Punkte entspricht der Kurve aBGDd (Durchschnitt durch die „Lichtfläche“ nach Mach). Ob nun der Lichtfleck um A und der Lichtfleck um C voneinander gesondert wahrgenommen werden, das hängt zunächst ab von der Ausdehnung der belichteten Flächen und der Lichtverteilung in ihnen*). Wenn nämlich jene lichtempfindlichen Netzhautelemente (Zapfen), welche von den beiden Leuchtpunkten am stärksten bestrahlt werden, einen Zapfen zwischen sich haben, dessen Belichtung auch nur ein wenig schwächer ist als ihre eigene, so kann dem Beobachter zwischen zwei hellen Stellen eine minder helle bemerklich werden, womit eine räumliche Sonderung der ersteren gegeben ist (Hering[43], S. 155). Ob aber im speziellen Falle die gegebene schwächere Belichtung tatsächlich merkbar wird, das hängt weiterhin ab von der Empfindlichkeit der Netzhautelemente in A, E und C für Lichtunterschiede. Mithin spielen hier alle jene Faktoren herein, welche neuerdings insbesondere Hering([43]), § 19—36) eingehend erörtert hat. Dementsprechend wird bei den Untersuchungen über das Auflösungsvermögen des Auges nicht bloß Rücksicht zu nehmen sein auf die absolute Lichtstärke der beobachteten Objekte und auf das Verhältnis ihrer Lichtstärke zu der der Umgebung (bei farbigen Objekten außerdem auf den Farbenunterschied), sondern auch auf die allgemeine Lichtempfindlichkeit der Netzhaut (den allgemeinen Adaptationszustand derselben), auf die Lokaladaptation und auf den Grenzkontrast.**)

Denken wir uns nun, es bilde sich auf der Retina zwischen A und C (Fig. 1) ein schwarzer Punkt auf sonst gleichmäßig hellem Grunde ab, so wird für die Belichtung der Netzhaut das Schema der Figur 1 ebenfalls zutreffen, wenn wir die Belichtungskurve von B gegen x und von D gegen x′ hin parallel zu XX′ verlängern, so daß die Belichtungskurve durch xBGDx′ dargestellt wird. Für die Wahrnehmung eines schwarzen Punktes auf gleichmäßig hellem Grund gelten also im Prinzip ähnliche Voraussetzungen, wie für die Wahrnehmung eines dunklen Zwischenraumes zwischen zwei hellen Punkten, nur sind freilich im letzteren Falle die Verhältnisse verwickelter, schon deshalb, weil nicht ein, sondern mehrere Details zu erkennen sind. Denken wir uns die Kurve aBGDd in Figur 1 als Querschnitt durch die Lichtflächen zweier zur Papierebene senkrechter heller Linien auf dunklem Grund und die Belichtungskurve xBGDx′ als Querschnitt des Netzhautbildes einer ebenso stehenden schwarzen Linie auf gleichmäßig hellem

*) Hier setzt die für die augenärztliche Praxis zumeist wichtige Folgerung aus der Prüfung des Auflösungsvermögens an. Ist nicht bloß ein physiologisches „Aberrationsgebiet“, sondern infolge mangelhafter optischer Einstellung des Auges ein pathologischer „Zerstreuungskreis“ vorhanden, so wird sich das Auflösungsvermögen natürlich entsprechend verschlechtern.

**) Unter „Kontrast“ wird hier natürlich der physiologische Vorgang im Sehorgan verstanden, nicht aber, wie dies seit Aubert vielfach gebräuchlich ist, der Helligkeitsunterschied zwischen Objekt und Grund.

Grund, so läßt sich die prinzipielle Übereinstimmung dieser beiden Fälle auch ohne jede spezielle Annahme über die Netzhautbilder leicht klar machen: im ersten Falle mißt man die Grenze der gesonderten Wahrnehmung zweier, durch einen dunklen Zwischenraum getrennter, heller Linien, im zweiten Falle die Grenze der gesonderten Wahrnehmung zweier durch einen dunklen Zwischenraum getrennter heller Flächen.

Das Studium des Auflösungsvermögens des Auges muß sich ferner auch erstrecken auf die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit isolierter heller Punkte oder Striche auf dunklem Grunde, bzw. auf die gesonderte Wahrnehmbarkeit des hellen Zwischenraumes zwischen dunklen Punkten oder Strichen und auf den Einfluß, welchen die verschiedenen äußeren und inneren Bedingungen darauf nehmen.

Wir ordnen den Stoff im folgenden so an, daß wir zunächst den allgemeinen Vorgang bei der Messung des Auflösungsvermögens besprechen, dann die Wahl der Probeobjekte, und endlich die Methoden zur Untersuchung des Einflusses, welchen mehrere der erwähnten Faktoren auf das Auflösungsvermögen ausüben.

1. Vorgehen bei der Messung des Auflösungsvermögens im allgemeinen. Denken wir uns als Beobachtungsobjekt etwa zwei leuchtende Punkte oder zwei schmale parallele Striche (Leuchtlinien) gegeben, so erhält man den kleinsten Gesichtswinkel x, unter welchem die zwei Leuchtpunkte (oder Linien) eben noch gesondert wahrgenommen werden, aus $\operatorname{tg} x = \frac{d}{e}$, worin d der Abstand der beiden Leuchtpunkte voneinander und e ihre Entfernung vom Knotenpunkte des Auges ist.*) Man kann nun entweder so vorgehen, daß man bei konstantem Abstande der beiden Lichtpunkte voneinander ihre Entfernung vom Auge e verändert, oder bei konstanter Entfernung vom Auge mit Hilfe einer Mikrometerschraube den gegenseitigen Abstand d der Lichtpunkte in meßbarer Weise variiert. Da aber das minimum separabile für das zentrale Sehen sehr klein ist, so muß man entweder die Lichtpunkte einander sehr stark nähern, oder die Objekte in sehr weiten Abstand vom Auge bringen. Die Methode ist daher in dieser Form recht unbequem. Man kann mit viel größeren, technisch leichter exakt herzustellenden Objekten und mit kleineren Entfernungen vom Auge arbeiten, wenn man die Verkleinerung auf optischem Wege, mittels des Makroskops von Volkmann(6), S. 4 ff.) besorgt. Volkmann nahm aus einem Fernrohre alle Linsen mit Ausnahme des Objektivs fort, und betrachtete das von letzterem entworfene verkleinerte reelle Bildchen entfernter Objekte, indem er das Auge in das offene Okularende des Fernrohres hineinlegte und den Teleskopröhren mit Hilfe der Auszüge die passende Länge gab. Aubert(1), S. 200) befestigte ganz analog die Sammellinse eines Mikroskopokulares in ausziehbaren geschwärzten Messing- (oder Papp-)röhren. Die Berechnung des Gesichtswinkels gestaltet sich folgendermaßen. Sei E der

*) In welchen Fällen der Scheitel des „Distinktionswinkels“ nach Gullstrand statt in den Knotenpunkt in den Haupt- oder Brennpunkt zu verlegen ist, darüber vergl. man Hess (Handb. d. Augenheilk., 2. Aufl., Bd. 8, Abt. 2, S. 185 ff.).

Abstand des Objektes, e der Abstand des Bildes von der Linse und f deren Brennweite, O die Objektgröße und o die Bildgröße, so ist nach der Linsenformel

$$\frac{1}{e} = \frac{1}{f} - \frac{1}{E}$$

$$\text{und daraus } e = \frac{Ef}{E - f},$$

$$\text{ferner } o = \frac{eO}{E}.$$

Befindet sich das Auge in der Entfernung S vom Bild, so ist $\frac{o}{S}$ die Tangente des Gesichtswinkels x für o. S ist aber gleich der Entfernung des Knotenpunktes des Auges von der Linse weniger dem Bildabstand von der Linse e. Ist E sehr beträchtlich größer als f, so kann man statt e ohne merklichen Fehler f setzen und findet dann $tgx = \frac{o}{S} = \frac{O.\,f}{E.\,S.}$.

Selbstverständlich kann man jetzt wieder entweder den Abstand der Lichtpunkte oder -Striche voneinander variieren, oder man ändert bei konstanter Größe und gleichem Abstand des Objektes von der Linse die Entfernung des Auges S durch Ausziehen oder Zusammenschieben der Röhren (man beachte dabei aber das auf der folgenden Seite Gesagte).

2. Bei der großen Anzahl von Faktoren, von denen das Auflösungsvermögen des Auges abhängt, wird schon die Wahl des Objektes, das zur Bestimmung der Grenze des Auflösungsvermögens dienen soll, auf das Resultat von Einfluß sein. Die einfachsten Probeobjekte sind dunkle Punkte auf hellem Grunde oder umgekehrt helle Punkte auf dunklem Grunde. Aubert[1], S. 193 ff. dort auch die ältere Literatur) benutzte kleine Quadrate, welche mittels des Makroskops so stark verkleinert wurden, daß sie wie Punkte aussahen, und verglich die Grenze ihrer Wahrnehmbarkeit mit der von längeren Streifen, deren Breite gleich der Seitenlänge der Quadrate war. Guillery[31]) hat die Verwendung von schwarzen Kreisflächen verschiedener Größe auch als Sehproben für die Praxis vorgeschlagen, und diesen Vorschlag wiederholt[32, 33, 38]) gegen theoretische Angriffe verteidigt (vergl. unten S. 107).

Der Verwendung einfacher Punkte als Probeobjekt zunächst kommt die Bestimmung des kleinsten eben merklichen dunklen Zwischenraumes zwischen zwei hellen Linien oder Punkten — bezw. umgekehrt des eben merklichen hellen Zwischenraums zwischen dunklen Linien oder Punkten. Volkmann bediente sich zu diesem Zwecke teils zweier parallel gespannter Silberdrähte von 0,05 mm Dicke, welche gegen einen hellen Hintergrund betrachtet wurden, und mittels eines Schraubenmikrometers ohne Störung des Parallelismus einander beliebig genähert werden konnten; teils zweier schmaler weißer Papierstreifen, welche mit dem Makroskop entsprechend verkleinert wurden. Aubert[1]), S. 213) stellte sich einen Apparat her, welcher aus zwei mit schwarzem Papier überklebten Papptafeln bestand. Die eine feste trug an ihrem Rande einen weißen Papierstreifen (2 mm breit), die andere konnte mittels eines Schnurlaufs vom Beobachter so verschoben werden, daß der auf ihr befindliche weiße Papierstreifen von denselben Dimensionen dem anderen

beliebig genähert, bezw. von ihm entfernt werden konnte. Das Ganze wurde mittels Makroskops verkleinert. Durch Variation der Entfernung des Auges von dem durch die Makroskoplinse entworfenen Bildchen wurde der Gesichtswinkel, unter welchem jeder einzelne Streifen (als feine Lichtlinie) sichtbar war, verändert, und für verschiedene Werte desselben durch Annähern und Entfernen der Streifen gegeneinander das Minimum separabile bestimmt. Dieses nimmt nach Aubert zu, wenn der Gesichtswinkel, unter dem die Striche erscheinen, abnimmt. Nimmt man statt weißer Streifen auf dunklem Grunde umgekehrt dunkle Streifen auf hellem Grunde, so wird der kleinste Gesichtswinkel für die gesonderte Wahrnehmung größer. Verwendet man statt heller Linien kleine helle Flecke, etwa wie Aubert([1]), S. 228) kleine weiße Quadrate auf schwarzem Grunde, welche mit dem Makroskope soweit verkleinert werden, daß sie als helle Punkte erscheinen, so zeigt sich bei analoger Untersuchungsmethode derselbe Einfluß des Gesichtswinkels, unter welchem der einzelne Punkt gesehen wird, auf das Minimum separabile, wie bei Strichen.

Als Untersuchungsobjekte sind häufig Doppelsterne (vergl. Aubert[1]), S. 210) verwendet worden. Man muß aber berücksichtigen, daß in diesem Falle die Grenze des Auflösungsvermögens für das dunkeladaptierte Auge bestimmt wird, und daß daher die Zahlen mit denen am helladaptierten Auge nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Man vergl. ferner bezüglich des Einflusses der Sternhelligkeit Aubert([1]), S. 233).

Andere Grenzen für das Auflösungsmögen des Auges erhält man schon, wenn man die feinen Lichtpunkte auf einer größeren Fläche in Quinkunzialanordnung verteilt. Du Bois Reymond[13]) benutzte von hinten durchleuchtete runde Löcher von etwa 0,2 mm Durchmesser und $2\frac{1}{2}$ mm Zentralabstand voneinander in einem Stanniolblatt. Technisch zuverlässiger ist es, nach Örum[50]) (vergl. auch Silfvast[57])), die feinen Löcher in ein dünnes Messingblech zu bohren und den Grat auf der Rückseite zu entfernen. Bei dieser Versuchsanordnung verschmelzen in einer gewissen Entfernung vom Auge die Lichtpunkte den 3 Hauptrichtungen ihrer Anordnung nach zu Linien, an denen sich die Zusammensetzung aus Punkten zunächst noch durch perlschnurartige Verdickungen zu erkennen gibt (Illustration zu den in Fig. 1 skizzierten Verhältnissen).

Von den besonderen Erscheinungen, welche bei Beobachtung feiner paralleler Striche oder von feinen Punkten auftreten, sind zu erwähnen: 1. das von Purkynje, Helmholtz (O. S. 257) u. a. beschriebene Welligwerden gerader Linien. Voraussetzung hierfür ist nicht unbedingt Feinheit der Linien, sondern es bekommt, wie v. Fleischl[268]) mit der unten S. 184 erwähnten Vorrichtung nachgewiesen hat, jeder beliebig große Streifen einen welligen Rand, sobald sein Netzhautbild mit mäßiger Geschwindigkeit über die Netzhaut hingleitet.

2. das zeitweilige Verschwinden und Wiederauftauchen feinster schwarzer Punkte, welche man bei starker Verkleinerung derselben bis knapp an die Grenze der Wahrnehmung und bei etwas herabgesetzter Beleuchtung (mäßiger Dunkeladaptation) beobachtet („Punkttauchen“, Hensen[40])).

Andere Probeobjekte als bloße Punkt- und Linienpaare bringen in die Versuchsanordnung weitere Komplikationen hinein. Dies gilt schon von feinen Gittern (aus schwarzen Drähten, — die Zwischenräume gleich dem Durchmesser der Drähte — gegen einen hellen Hintergrund betrachtet, Helmholtz, O. S. 257). Mit diesen findet man das Auflösungsvermögen um so größer, je ausgedehnter das Probeobjekt ist (Wertheim[64])).

Verwendet man noch komplizierter geformte Probeobjekte, so muß man sich jedesmal sehr sorgfältig die Frage vorlegen, ob man mit denselben nicht am Ende etwas anderes bestimmt, als man eigentlich beabsichtigt. So ist die Untersuchung des Auflösungsvermögens mittels der bekannten Snellenschen Haken*) (Fig. 2a) scheinbar nahe verwandt mit der Untersuchungsmethode mittels paralleler Striche; und wenn man sich in praxi der Snellenschen Haken zur Untersuchung der „Sehschärfe" bedient, hält man meist auch daran fest, es handle sich dabei um eine Unterscheidung der 3 parallelen geraden Striche voneinander, deren Distanz also nach der geläufigen praktischen Einheit der Sehschärfe an der Grenze der gesonderten Wahrnehmbarkeit unter einem Gesichtswinkel von 1′ erscheinen soll. Benutzt man aber als Kriterium das Erkennen der Richtung, nach welcher die 3 Zacken des Hakens hinsehen, so wird man diese schon angeben können, bevor man die parallelen Striche genau sondern kann. Man erkennt sie daran, daß die ganze eine Seite des Hakens dunkler ist als die andere, also an der Helligkeitsverteilung in dem verwaschenen Fleck, den man zunächst sieht. Man wird also mit ihnen leicht scheinbar eine höhere Sehschärfe finden, als mit anderen Proben. Besser, aber auch noch nicht einwandsfrei sind in dieser Beziehung jene Snellenschen Haken, bei denen der mittlere Querstrich fehlt, so daß die übrig bleibenden Striche drei Seiten eines Quadrates bilden (Fig. 2b).

a b c

Fig. 2.

Nicht zu befürchten ist eine solche Verwechslung bei den Optotypi von Landolt(4), S. 483ff., vergl. dazu auch Koster[45]), schwarzen Ringen auf weißem Grund, welche an einer Stelle durch eine Lücke mit parallelen Rändern unterbrochen sind (siehe Figur 2c). Die Ringe werden in verschiedener Größe auf Tafeln analog den Snellenschen Probebuchstaben angeordnet, der Untersuchte hat anzugeben, an welcher Stelle sich die Lücke befindet. Auch hier kommt es wohl vorwiegend darauf an, daß, noch bevor die Grenze des deutlichen Sehens erreicht ist, eine verwaschene etwas hellere Stelle am Ringe erkannt wird. Dieses Erkennen hängt zwar auch zum Teil von Nebenumständen ab, wie z. B. der Form des Ringes, aber die letztere ist bei diesen Probeobjekten wenigstens eine einheitliche und verhältnismäßig einfache. Viel schlimmer steht es in dieser Beziehung mit den in praxi am meisten benutzten Snellenschen Probebuchstaben, bei welchen die Formen stark variieren und vergleichsweise sehr kompliziert sind. Ihrer Konstruktion liegt bekanntlich die Voraussetzung zugrunde, daß das normale Auge Details, welche unter einem Gesichtswinkel von 1′ gesehen

*) H. Cohn[24]) hat diese Methode in folgende einfache Form gebracht. 8 Snellensche Haken (deren Querstrichabstand in 6 m Entfernung unter einem Gesichtswinkel von 1′ erscheint) sind im Kreise auf einer weißen Kartonscheibe von 9 cm Durchmesser gedruckt. Über derselben und um deren Mittelpunkt drehbar befindet sich eine zweite von stumpfblauem Karton, welche durch eine runde Öffnung nur einen der 8 Haken sehen läßt. Ein Gehilfe dreht die Deckscheibe nach jeder Probe beliebig so lange, bis ein anderer (anders gerichteter) Haken zum Vorschein kommt. Das Täfelchen kann an allen 4 Seiten mit Ösen aufgehängt werden, so daß eine genügende Variation der Hakenrichtung möglich ist. Mittels einer dreizinkigen Gabel aus Karton gibt der Untersuchte die Richtung der Haken an.

werden, eben zu erkennen vermag. Es wurde aber dann von verschiedenen Seiten (vergl. z. B. Landolt[4]), S. 481) darauf hingewiesen, daß sich das Erkennen der verschieden geformten Buchstaben in ganz anderer Weise vollzieht, als es das Konstruktionsprinzip voraussetzt. Insbesondere lieferten systematische Untersuchungen von Guillery[32, 37]) und Pergens[52 bis 54a]) über die Faktoren, welche das Erkennen so komplizierter Formen, wie der Snellenschen Haken und Buchstaben, aber auch schon der Landoltschen Ringe, beeinflussen, das Ergebnis, daß dieses Erkennen ein äußerst verwickelter Vorgang ist, der keineswegs allein vom Gesichtswinkel, unter welchem die Einzelheiten erscheinen, abhängig ist. Guillery bezeichnete die Fähigkeit, mit dem Gesichtssinn die Form der Objekte zu erkennen, mit einem besonderen Namen als den Formensinn des Auges*), und er schlug vor, auch zur klinischen Untersuchung der sogenannten „Sehschärfe" einfache dunkle „Punkte", Kreisflächen von verschiedener Größe, auf hellem Grunde als Sehproben zu berücksichtigen.

Theoretisch ist dies gewiß die einfachste Untersuchungsmethode des Auflösungsvermögens im oben definierten Sinne, d. h. die Fähigkeit, Details wahrzunehmen. In der praktischen Durchführung der Idee werden die Dinge aber sogleich wieder komplizierter. Um eine sichere Kontrolle zu haben, daß der Untersuchte den schwarzen Kreisfleck wirklich sieht, brachte Guillery dieselben an verschiedenen Stellen und in verschiedener Größe auf weißen, schwarz umrahmten Quadraten an. Der Untersuchte hat dann anzugeben, wo er den Fleck im Quadrate sieht. „Guillerys Sehzeichen ist also eigentlich in schwarzem Rahmen ein weißes Viereck, das einen dunklen Fleck enthält" (Landolt[47]), S. 602). Über die Verwendbarkeit dieser Schproben in der Praxis muß sich natürlich der Theoretiker des Urteils enthalten. Nur der Kliniker vermag durch Prüfung an einem großen Material zu entscheiden, welche Methode sich für seine Zwecke am besten eignet. Man vergl. darüber die Äußerungen von Landolt[47]), Koster[45]) und die Antwort von Guillery[39]). Für wissenschaftliche, insbesondere vergleichende Untersuchungen des Auflösungsvermögens unter verschiedenen Bedingungen, wobei an die Beobachtungsgabe und Zuverlässigkeit der Versuchsperson ganz andere Anforderungen gestellt werden können als in der Praxis, ist die Untersuchung mittels einfacher dunkler Flecke zweifellos als die einfachste in erster Linie zu berücksichtigen.

Ähnliche Gesichtspunkte, wie beim direkten Sehen, sind auch maßgebend für die Untersuchung des Auflösungsvermögens im indirekten Sehen. Natürlich müssen die Untersuchungsobjekte der geringeren Schschärfe der Netzhautperipherie entsprechend größere Dimensionen besitzen. Als Testobjekte benutzen Groenouw[30]) und Guillery[34]) isolierte schwarze kreisrunde Flecken auf weißem Grunde, Aubert (Aubert und Förster[10]); Aubert[1]), S. 244 ff.) zwei schwarze kreisrunde Scheibchen, Quadrate oder Streifen von verschiedener Größe und Distanz auf weißem Papier, welche an einem Perimeter (für geringere Entfernungen vom Zentrum wurde auch ein drehbarer ebener Schlitten benutzt) soweit nach der Peripherie verschoben

*) Vergl. dazu die Untersuchungen über die Wahrnehmung einfachster Formen unten S. 119 ff.

wurden, bis die Grenze für ihre gesonderte Wahrnehmung gefunden war. Landolt und Ito([4]), S. 571) verwendeten ebenfalls am Perimeter zwei schwarze Quadrate verschiedener Größe auf weißem Grunde, deren gegenseitiger Abstand jedesmal ihrer Seitenlänge entsprach. Buchstaben eignen sich nach Landolt für die Untersuchung der indirekten Sehschärfe noch weniger als für die direkte. Da es auch bei Verwendung von Quadraten selbst für den Geübten nicht leicht ist, genau anzugeben, wann sie noch getrennt wahrgenommen werden, empfiehlt Landolt zur Probe zwischendurch graue Rechteeke von derselben Ausdehnung wie die zwei Quadrate samt dem sie trennenden Zwischenraume einzuschalten, deren Grau der Mischung aus dem Schwarz der Quadrate und dem Weiß des Zwischenraumes entspricht, und welche daher, wenn die Quadrate nicht mehr gesondert wahrgenommen werden, leicht mit ihnen verwechselt werden.

Guillery[36]) kombinierte beide erwähnten Untersuchungsmethoden, indem er zunächst einen einzelnen Punkt (einen schwarzen Fleck auf weißem Karton) bis zur Grenze seiner Wahrnehmbarkeit mit der betreffenden Netzhautstelle verkleinerte. Für das Zentrum und seine nächste Umgebung geschah das durch ein Makroskop, für die Peripherie durch Einstellung in passende Entfernung vom Auge. Sodann wurde ein zweiter Karton mit einem anderen gleichen Fleck über den ersten vorgeschoben und der Grenzabstand gesucht, bei welchem die beiden Flecken eben noch gesondert wahrgenommen wurden. Weitere Literaturangaben siehe bei Landolt[4]), bis zum Jahre 1894 auch bei Wertheim[64]).

3. Die Variation der Belichtung, bei gleichbleibendem Verhältnis zwischen der Lichtstärke des Objektes und des Grundes führte Aubert([1]), S. 230) in der oben S. 104 angegebenen Versuchsanordnung herbei, indem er im Dunkelzimmer die Beleuchtung durch verschiedene Öffnung eines im Fensterladen eingelassenen Diaphragmas abänderte. Charpentier[21]) ließ vor dem Auge einen Episkotister mit verstellbarer Spaltbreite rotieren. Guillery[36]) kombinierte das Makroskop mit einem Episkotister vor demselben. Bei allen diesen Versuchen ist auf die sehr große Variation der Helligkeit des Tageslichtes Rücksicht zu nehmen (vergl. Cohn[23])). Eine meßbare künstliche Beleuchtung wird daher im allgemeinen vorzuziehen sein. Ferner ist durch Vorsetzen eines Diaphragmas dicht vor das Auge der Einfluß der wechselnden Pupillenweite*) auszuschalten und es ist die Adaptation des Auges bei längerem Verweilen unter geänderten Beleuchtungsverhältnissen zu beachten.**)

Zwei der letzten Forderung entsprechende Versuchsanordnungen rühren von Posch[55]) her. Als Untersuchungsobjekt diente in beiden Fällen ein System weißer, durch gleich breite schwarze Zwischenräume getrennter

*) Den Einfluß der Pupillenweite auf die Sehschärfe bei verschiedener Intensität der Beleuchtung studierte Hummelsheim[44]) in der Weise, daß er die Pupillenweite durch ein Mydriatikum (Homatropin) bezw. ein Miotikum (Pilokarpin) für die Versuchszeit unveränderlich gleich hielt, und nun die Sehschärfen für diese beiden Weiten und für die normale Pupillenweite untereinander verglich.

**) Nimmt man, wie dies bei praktischen Untersuchungen des Auflösungsvermögens der Fall ist, den geänderten Adaptationszustand mit in Kauf, dann kann man natürlich von vornherein nicht auf eine einfache Beziehung zwischen Lichtstärke und Auflösungsvermögen rechnen.

paralleler Linien, mit denen kreisförmige Scheiben von 50 mm Durchmesser ausgefüllt waren. Diese wurden auf einer Unterlage von schwarzem Samt mit einer Stecknadel im Zentrum befestigt und vor der Beobachtung von einem Gehilfen durch Drehung in beliebig wechselnde Stellung gebracht. Dann wurde die Distanz bestimmt, aus welcher der Beobachter bei langsamer Annäherung zuerst bestimmt die Richtung der parallelen Linien erkannte. In einer ersten Versuchsreihe wurden diese Distanzen für verschiedene Beleuchtungsstärken nacheinander bestimmt. Die Lichtquelle wurde in eine Laterna magica gestellt und der austretende stark divergierende Lichtkegel wurde an der gegenüber stehenden Wand des Dunkelzimmers durch eine schwarze Fläche aufgefangen, um eine störende diffuse Erhellung des Zimmers zu vermeiden. In die Richtung der austretenden Strahlen wurden dann die Objekte in verschiedenen abgemessenen Entfernungen von der Lichtquelle in der Nähe der Achse des Lichtkegels so aufgestellt, daß sie sich gegenseitig nicht beschatten konnten, und daß ihre Flächen genau senkrecht zur Richtung der Lichtstrahlen lagen. Ein in cm geteiltes Meßband wurde an ein Stativ neben der Lampe so befestigt, daß sein Nullpunkt genau in den Konvergenzpunkt der Lichtstrahlen zu liegen kam. Der Beobachter näherte sich, während er das Meßband neben dem Auge durch den Finger gleiten ließ, langsam den in Augenhöhe befindlichen Objekten, zog, sobald er die Richtung der Linien auf einem Objekte erkannte, das Meßband an, und ließ durch den Gehilfen die Entfernung vom Scheitel des Lichtkegels bis zum Auge ablesen.

Mittels einer zweiten Methode wurden die verschiedenen Objekte nebeneinander beobachtet. In den Lichtkegel der Lampe (oder einen analogen durch ein Sonnenmikroskop erzeugten Kegel von Sonnenlicht) wurde ein Episkotister gestellt. Dieser besaß vier konzentrische Reihen von Spalten, welche so angeordnet waren, daß in der ersten Reihe die Lücken und die dazwischen liegenden Speichen gleich breit waren; in der zweiten Reihe waren die Speichen dreimal so breit als die Lücken, in der dritten siebenmal und in der vierten fünfzehnmal. In die durch die Spaltenreihen fallenden Lichtbüschel und in die volle Beleuchtung wurde je eines der oben beschriebenen Versuchsobjekte eingestellt. Während nun der Episkotister gedreht wurde, wurden die Objekte dem Beobachter so weit genähert, bis er die Richtung der Linien erkannte.

Eine von Schmidt-Rimpler herrührende Methode, welche bloß Untersuchungen nacheinander gestattet, zitiere ich nach Cohn[22]), der sich ihrer ebenfalls bediente. Vor das Auge werden in einem besonderen Apparate graue Gläser vorgesetzt, deren Lichtabsorption mittels Photometer bestimmt wird. Die Gläser absorbieren allerdings nicht alle Farben gleichmäßig. Der Apparat hat die Form eines schwarz angestrichenen Doppelrohres aus Blech; in das eine Rohr kommen die grauen Gläser, das andere wird durch eine schwarze Blechplatte verschlossen. Ein mit schwarzem Tuch gefütterter Ansatz zum Anlegen an den Kopf verhindert das Einfallen seitlicher Lichtstrahlen. Als Beobachtungsobjekt benutzte Cohn die Snellenschen Haken. Da er praktische Zwecke im Auge hatte, wartete er mit jeder Bestimmung so lange, bis der Untersuchte an die geänderte Helligkeit adaptiert war.

Über weitere Versuchsanordnungen orientieren die Abhandlungen von Uhthoff[60]) und Oguchi[51]).

Vergleichende Untersuchungen über die Sehschärfe im monochromatischen Licht verschiedener Wellenlänge sind insbesondere

von Uhthoff[60, 61, 62]) mit verschiedenen Methoden ausgeführt worden, nämlich:

1. unter Verwendung matt-schwarzer (berußter) Snellenscher Haken, welche ausgeschnitten auf verschiedenfarbigen Tuchen drehbar befestigt wurden, während die Beleuchtungsintensität durch Entfernen und Nähern einer Lampe von 4 Normalkerzen variiert wurde.

2. Mittels eines großen Prismas (mit Zimtsäureäthylester gefüllt) und den entsprechenden Konvexlinsen wird ein objektives Spektrum entworfen. In der Ebene des Spektrums befindet sich ein verschieblicher Metallschirm mit einer kleinen Öffnung, durch welches das Auge des Beobachters das Prisma in monochromatischem Lichte leuchtend sieht. Das Testobjekt zur Bestimmung der Sehschärfe konnte zwischen Auge und Prisma auf einer Rutschbahn mittels Schnurlaufs genähert und entfernt werden. Als Testobjekte dienten anfangs drehbare undurchsichtige Snellensche Haken, später ein feines Drahtgitter, dessen Drähte genau um ihre Dicke auseinander standen.

3. In letzter Zeit bestimmten Boltunow[14]) und Loeser[49]) die zentrale Sehschärfe bei farbiger Beleuchtung im Dunkelzimmer (bei mäßiger Dunkeladaptation) mit folgender Einrichtung. Durch das Licht einer Auerlampe mit vorgesetzten farbigen Gläsern wurden Landoltsche Ringe (siehe oben Fig. 2b), welche in einer Metallplatte ausgeschnitten waren*), zum Leuchten gebracht (zum Vergleich auch feine Punktreihen). Die Helligkeit der verschiedenen farbigen Lichter wurde zunächst mit dem Flimmerphotometer von Schmidt u. Haensch untereinander gleichgemacht. Die spätere Variation der Belichtung mit den flimmeräquivalenten Lichtern erfolgte durch einen Episkotister.

Der rein praktischen Frage, wie weit das Auflösungsvermögen des Auges für Details an verschieden gefärbten, körperlichen Objekten reicht, ist Wächter[63]) näher getreten. Er betrachtete aus abgemessener Entfernung Würfel von verschiedenem Material und verschiedener Farbe, deren Seitenlänge gleich der Augendistanz war. Die Würfel wurden so aufgestellt, daß dem Beschauer eine Fläche zugekehrt war, und daß die geradeaus gerichtete Gesichtslinie des rechten Auges in die Ebene der rechten, die des linken Auges in die Ebene der linken sagittal gestellten Seitenfläche des Würfels zu liegen kam. Dann wurde ermittelt, wie weit man den Kopf nach rechts bezw. links verschieben mußte, um eben die rechte bezw. linke Seitenfläche des Würfels zu erkennen.

4. Den Einfluß der Variation des Verhältnisses zwischen der Lichtstärke des Probeobjektes und des Grundes, auf das Auflösungsvermögen, hat zunächst bezüglich der Wahrnehmbarkeit isolierter Punkte Aubert[1]), S. 199) mittels folgender Anordnung untersucht: Ein aus weißem oder schwarzem Papier geschnittenes Quadrat wird an einem dünnen schwarzen Draht befestigt und dieser auf ein Stativ gesteckt. 200 mm hinter dem Quadrat befindet sich ein Farbenkreisel mit schwarz-weißen Sektoren, mittels welchen man das Quadrat auf beliebig hellem grauen Grunde erscheinen lassen kann. Alle sonstigen Teile des Apparates sind geschwärzt und den Hintergrund bildet eine schwarze Wand. Das Ganze wird mit dem Makroskop verkleinert und durch Variation des Augenabstandes von dem durch die Makroskoplinse entworfenen Bildchen der kleinste Gesichts-

*) Loeser verwendete wie Uhthoff undurchsichtige zweizinkige Snellensche Haken (Figur 2b) auf durchleuchtetem Grunde, Sifvast[57]) Punkte in Quinkunzialanordnung.

winkel aufgesucht, bei welchem der „Punkt“ eben noch wahrnehmbar ist. Einer sehr ähnlichen Versuchsanordnung bediente sich später auch Guillery[35]).

Den kleinsten Gesichtswinkel für die Wahrnehmbarkeit isolierter grauer Quadrate verschiedener Helligkeit, die auf schwarzem Grund aufgeklebt waren, bestimmte Groenouw[30]). Die Grenze für die Wahrnehmbarkeit des dunklen Zwischenraumes zwischen zwei grauen Streifen oder Quadraten untersuchte Aubert in seinem oben S. 104 beschriebenen Apparate. Über die Bestimmung der Lichtremission des grauen Papieres vergleiche man die Methodik der Lichtsinnuntersuchung.

Für den Spezialfall, daß die Probeobjekte möglichst lichtlos bleiben, und nur die Helligkeit des Grundes wechselt, haben Charpentier([21]), S. 51) und Cohn[23]) Untersuchungsmethoden angegeben. Charpentier verwendete zu diesem Behufe sein Differentialphotoptometer (Beschreibung in[20]), Cohn einen von L. Weber konstruierten Polarisationsapparat, beide Autoren nahmen undurchsichtige Probeobjekte auf transparentem Grunde.

Mit dem Umstande, daß sich die von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen auf der Retina stets über ein gewisses Gebiet ausbreiten, steht wohl auch die Beobachtung in Zusammenhang, daß zwei kleinste, direkt gesehene Lichtflächen (bis zu einem Gesichtswinkel von $2'-3'$) trotz verschiedener Größe die gleiche untere Grenze der Wahrnehmbarkeit besitzen, wenn das Produkt aus Flächengröße und Lichtstärke bei beiden dasselbe ist. Riccò[56]), Charpentier[19]), Guillery[33]), Asher[9]) u. a. haben das in mannigfach variierten Versuchen nachgewiesen. Nach Asher erscheinen in diesem Falle beide Felder auch gleichgroß. Ich erwähne als Beispiel eine Versuchsanordnung von Asher (l. c. S. 409). In den hinteren Deckel einer Heringschen Dunkelröhre wurden nebeneinander 2 kleine Irisblenden eingesetzt, deren Blendenöffnungen unter dem Mikroskop ausgemessen worden waren. Hinter die Blenden wurden graue Papiere von bekanntem Lichtverhältnis in einer und derselben Ebene derart aufgestellt, daß sie gleich gut beleuchtet waren. Aus einer Entfernung, in welcher die beiden Blendenöffnungen deutlich getrennt sichtbar waren, ordnete der Beobachter so lange eine Verstellung der Blenden an, bis ihm die Objekte gleich hell und gleich groß erschienen.

Ausgedehnte Untersuchungen über die Abhängigkeit der Wahrnehmung etwas größerer Objekte von ihrer Größe und Helligkeit hat dann S. Exner[26]) ausgeführt, indem er aus abgemessener Entfernung mit dunkeladaptiertem Auge ein schwach beleuchtetes Quadrat betrachtete, dessen Größe variiert werden konnte, und durch Drehung zweier Nicolscher Prismen gegeneinander das Minimum an Helligkeit ermittelte, bei welchem die Fläche eben sichtbar wurde. In analoger Weise bestimmte Exner die Abhängigkeit des Erkennens von Formen (Erkennen der Lage eines Rechteckes, des Snellenschen Buchstabens B) von der Größe und Helligkeit.

5. Zum Vergleich des Auflösungsvermögens des hell- und dunkeladaptierten Auges haben Bloom und Garten[12]) (vergl. auch Buttmann[18]), E. Fick[28]) und Broca[17])) mehrere Versuchsanordnungen angegeben, von denen hier zwei mitgeteilt werden sollen. Das eine Auge wurde in diesen Versuchen durch einen lichtdichten Verband längere Zeit verdunkelt. Der Verband wurde, um einen Druck auf das Auge zu vermeiden, entweder über einem Ringe aus dickem Gummi, der um das Auge

lief, oder über einer mit Tuch gefütterten geräumigen Zelluloïdkapsel angelegt, welche in Form einer Halbkugel von 7 cm Durchmesser, weit vom Auge entfernt, den Weichteilen des Gesichtes anlag (Garten[29]). Das andere Auge blieb helladaptiert.

Zur Bestimmung der Sehschärfe diente nun 1. folgender Apparat. Im Boden und im Deckel eines lichtdichten Kastens war einander gegenüber je ein Nicolsches Prisma eingelassen. Als Lichtquelle für dies improvisierte Polarimeter diente eine Glühlampe, deren Licht mittels eines drehbaren weißen Schirms in beliebiger Stärke durch den Polarisator hindurch gespiegelt werden konnte. Auf der Fassung des oberen Nicols (des Analysators) war außen ein dicker Gummiring befestigt, auf welchen das Auge fest aufgelegt wurde, so daß ein fast vollständiger Abschluß von seitlichem Licht zustande kam. An dem innen im Kasten befindlichen Rande des Analysators war ein Diaphragma von 2 mm Durchmesser angebracht, welches die Verschiedenheit der Pupillenweite beider Augen ausgleichen sollte. Im Kasten befand sich eine horizontale, durch Fadenzug von außen drehbare Messingscheibe, welche an ihrer Peripherie mit einem Kranze von 7 mm großen Löchern versehen war. Die Achse der Scheibe war so angebracht, daß bei ihrer Drehung die Mittelpunkte der Löcher in der Verbindungslinie der beiden Nicols zu liegen kamen. Auf der Messingscheibe war eine Glasscheibe befestigt, auf der entsprechend den Löchern der Messingscheibe durchscheinende Snellensche Haken auf möglichst dunklem Grunde in den verschiedensten Lagen und Größen angebracht waren. Durch den Fadenzug konnte jede beliebige Größe von dem Gehilfen rasch eingestellt werden. Der Abstand der Haken vom Auge betrug 15 cm. So wurde zunächst die zentrale Sehschärfe des hell- und dunkeladaptierten Auges bei verschiedenen Lichtstärken miteinander verglichen.

Für die Sehschärfebestimmungen im indirekten Sehen befand sich im Kasten noch folgende Fixiervorrichtung. Auf einer horizontalen Glasplatte, welche sich dicht oberhalb der Probenplatte befand, waren in bestimmten Abständen von der optischen Achse der Nicols je zwei zugespitzte Stanniolstreifen mit ihren Spitzen in kaum meßbarem Abstande voneinander aufgeklebt und von beiden isolierte Drähte nach Metallösen geführt, welche außen am Kasten befestigt waren. Zwischen je zwei beliebigen Spitzen konnte man nun durch Umhängen der Zuführungsdrähte den schwachen Funkenstrom eines Induktionsapparates übergehen lassen. Um die Lichtstärke der Funken möglichst herabzusetzen, war die mit Stanniolstreifen beklebte Platte noch mit rotem Glase bedeckt, unter Freilassung der der Sehprobe entsprechenden Stelle.

2. Bei einer zweiten Versuchsanordnung zur vergleichenden Bestimmung der Sehschärfe auf der Netzhautperipherie wurde im Dunkelzimmer auf einem mit schwarzem Tuche bedeckten Tische ein mit schwarzem Wollpapier überzogenes Reißbrett senkrecht aufgestellt. In 30 cm Abstand vor ihm befand sich das Auge des Beobachters (Kopf mit Stirnhalter festgestellt). Gerade gegenüber dem Auge war eine Fixiereinrichtung angebracht, bestehend aus 4 weißen Leuchtstoffpunkten, welche die Ecken eines Quadrates von etwa 2 cm Seitenlänge einnahmen. In der Mitte des Quadrates befand sich ein fünfter Punkt. Durch ein Aubertsches Diaphragma im Fensterladen wurde die Beleuchtung soweit herabgesetzt, daß bei Fixation der zentrale Punkt für das dunkeladaptierte Auge unsichtbar, die 4 Eckpunkte dagegen sichtbar blieben. Schwankungen der Blickrichtung von solcher Größe, daß sie das Versuchsergebnis wesentlich beeinträchtigen konnten, machten sich durch Verschwinden eines der 4 Eckpunkte bemerklich. Als Testobjekte zur Bestimmung der exzentrischen Sehschärfe dienten kleine Rechtecke aus weißem Karton, welche bei den Bestimmungen am dunkeladaptierten Auge an kleinen Haltern soweit an den Fixationspunkt herangehoben wurden, bis ihre Lage richtig erkannt wurde. Bei der Untersuchung des helladaptierten Auges wurde, da sie sehr rasch ausgeführt werden mußte, auf die Verschiebung verzichtet, vielmehr wurde vorher das Testobjekt in bestimmter Lage eingestellt und verdeckt. Der Beobachter, der vorher ins Helle gesehen hatte, schließt rasch den Fensterladen, nimmt seine Stellung ein, und sobald er gut fixiert, läßt der Gehilfe auf ein gegebenes Zeichen das Testobjekt frei. Die Sehschärfebestimmung erfolgt also nach der Methode der wahren und der falschen Fälle.

Bei dieser Anordnung konnte auch eine Untersuchung bei ungefähr gleicher subjektiver Helligkeit für beide Augen durchgeführt werden, indem durch willkürliches Schielen Doppelbilder erzeugt wurden, und durch Vorsetzen von Rauchgläsern vor das dunkeladaptierte Auge die Helligkeit der beiden Halbbilder ungefähr gleich gemacht wurde.

6. Die Herabsetzung der zentralen Sehschärfe durch gesteigerte Belichtung exzentrischer Netzhautstellen beruht teils auf Vermehrung des „falschen Lichtes", teils auf einer Änderung der Lichtempfindlichkeit infolge Wechselwirkung der Netzhautstellen. Bei starker Änderung der Beleuchtung kann sich außerdem der Adaptationszustand des Auges im ganzen ändern. Den Einfluß insbesondere der beiden ersten Faktoren auf die Sehschärfe hat neuerdings Hering[43]) § 34, 35) eingehend erörtert und durch zahlreiche Versuche erläutert, auf die hier ausdrücklich verwiesen werden soll.

Eine Charakterisierung des Einflusses starker Belichtung („Blendung") der Netzhautperipherie auf die zentrale Sehschärfe im allgemeinen haben Depène[25]) und Borschke[15], [16]) versucht (vergl. daselbst auch die frühere Literatur).

Der von Depène benutzte, von Uhthoff konstruierte Blendungsapparat besteht aus einem Träger für die Sehproben und für die sie beleuchtende Lampe, ferner einer zweiten Lampe, durch welche die seitliche Blendung besorgt wird. Der Träger für die Sehproben und die Beleuchtungslampe kann auf einer Holzschiene vom Auge entfernt oder ihm genähert werden. Am Ende dieser Schiene ruht der Kopf des Beobachters auf einer Kinnstütze auf. Von demselben Ende der Schiene geht im Winkel ein runder Eisenstab aus, welcher das Blendungslicht trägt, und dem man durch Drehen um seinen Ansatzpunkt einen beliebigen Winkel (bis zu 90°) mit der Richtung der Holzschiene geben kann, wodurch die Blendung auf verschieden weit exzentrische Netzhautstellen verlegt wird. Die Beleuchtungsstärke der Sehproben und ebenso die Lichtstärke des Blendungslichtes kann durch Vorschalten von Rauchgläsern jede für sich abgeschwächt werden. Die Größe des geblendeten Netzhautbezirkes wird variiert durch Vorsetzen von Blenden mit kreisförmigem zentralem Ausschnitt vor das Blendungslicht. Bezüglich der Details der Konstruktion ist das Original einzusehen.

Borschke[15]) befestigte auf einem transparenten, von hinten durchleuchteten kreisrunden Papiere auswechselbare undurchsichtige Snellensche Haken. Die Beleuchtung erfolgte durch eine Glühlampe, deren Leuchtkraft durch einen passenden Vorschaltwiderstand entsprechend abgeschwächt war. Durch Annäherung der Lampe an das transparente Papier wurde im Dunkelzimmer die schwächste Beleuchtung aufgesucht, bei welcher der Untersuchte die Haken eben noch zu erkennen vermochte. Hierauf wurde um den Kreis mit den Sehproben ein transparenter Ring durch sechs Glühlampen erhellt, und nun die Beleuchtungslampe den Sehproben neuerdings soweit genähert, bis sie wieder erkannt wurden.

Um weiterhin auch den Einfluß der Exzentrizität der geblendeten Stelle zu untersuchen, benutzte Borschke[16]) wieder denselben transparenten Papierschirm mit den auswechselbaren Haken und der verschieblichen Glühlampe. Die Blendung wurde aber durch das von einem Spiegel reflektierte Licht einer Glühlampe besorgt. Der Spiegel war auf einem Perimeter verschieblich angebracht, welches an Stelle des Fixationspunktes eine kreisrunde Öffnung besaß, durch welche der Beobachter auf den transparenten Schirm hindurchsah.

Mit der Frage nach dem Einfluß des abirrenden Lichtes auf die Sehschärfe hängt zusammen die nach dem Einfluß von zerstreutem Licht auf die Sehschärfe, welche Ladd-Franklin und Guttmann[46]) beim Sehen durch einen Schleier untersucht haben. Untersuchungen über die Sehschärfe im Flimmerlicht sind von Feilchenfeld[27]) ausgeführt worden.

b) Die Empfindlichkeit des Auges für Lagenunterschiede.

Diese vom Auflösungsvermögen des Auges streng zu sondernde eigentliche Feinheit des Raumsinnes des Auges soll hier nur soweit besprochen werden, als sie sich auf Unterschiede von Lagen und Längen im ebenen Sehfelde, also nach der Höhen- und Breitenausdehnung, bezieht. Die Feinheit der Tiefenwahrnehmung, zu deren Untersuchung ganz andere Methoden verwendet werden müssen, wird aus diesem Grunde an anderer Stelle (S. 164) erörtert.

Zur Bestimmung der Feinheit des Raumsinnes führt eine von Wülfing[65]) zuerst angewendete Methode. Ein von hinten durchleuchteter Spalt von $^1/_3$ mm Breite war so eingerichtet, daß man den unteren Teil desselben gegen den oberen feststehenden meßbar verschieben konnte. Es wurde der Gesichtswinkel für die eben merkliche Verschiebung der einen gegen die andere Hälfte aufgesucht. Zum gleichen Zwecke können mit schwarzer Tusche auf weißen Karton gezeichnete Nonien dienen. Empfehlenswerter wäre es nach Wülfing, wenn man derartige Nonien durch Ausgravierung des Belags eines Spiegels mittels einer Teilmaschine herstellte.

Eine andere von Hering angegebene Anordnung benutzte Best[11]). Eine quadratische, zur einen Hälfte schwarze, zur anderen weiße Eisenblechscheibe ist senkrecht zu der ganz scharfen Trennungslinie der beiden Felder in die Hälfte zerschnitten.*) Die eine Hälfte ist gegen die andere meßbar verschieblich. Die Platte ist drehbar, so daß die Trennungslinie senkrecht oder beliebig schräg gestellt werden kann. Durch einen Schirm mit kreisförmiger Öffnung sind die peripheren Teile des Apparates abgeblendet. Die Beleuchtung der mattweißen Platte wurde durch Reflexion diffusen Himmelslichtes mittels Spiegels möglichst verstärkt. Bei einer Entfernung der Platte von etwa 12 m vom äußeren Augenwinkel des Beobachters wurde nun nach der Methode der richtigen und der falschen Fälle, von einer fast sicher merklichen Verschiebung ausgehend, der kleinste Wert der Verschiebung bestimmt, „welcher, obzwar nicht sicher erkennbar, doch auf die Wahrnehmung noch mitbestimmend einwirkt". Ungefähr gleichzeitig untersuchte Stratton[59]) mit zwei schmalen weißen Streifen, welche eben merklich gegeneinander verschoben wurden. Er mußte aber wegen der großen Empfindlichkeit für Lagenunterschiede den Beobachter in 120 m Entfernung vom Apparate sitzen lassen.

Zu Werten von derselben Größenordnung führten Volkmanns([6]), S. 93 ff.) Untersuchungen der eben merklichen Verschiedenheit in der Dicke feiner Striche und über die untere Grenze der Wahrnehmung von Längenunterschieden zweier sehr kleiner miteinander verglichener Strecken.

Zwei verschieden breite schwarze Striche auf weißem Grunde wurden mittels des Makroskops verkleinert, und die Grenze festgestellt, bis zu welcher ein Unterschied in der Strichdicke noch mit Sicherheit erkennbar war. In einer zweiten Versuchsreihe wurden in dem oben S. 104 beschriebenen Schraubenmikrometer durch 3 parallele feine Silberdrähte, von denen der mittlere fest, die beiden seitlichen beweglich waren, zwei kleine Distanzen abgegrenzt. Die eine wird dem Beobachter, durch das Makroskop verkleinert, fest gegeben, und er hat die Aufgabe, die zweite nach dem Augenmaß der ersten gleich zu machen.

*) Da die Vorrichtung in dieser Form technisch ziemlich schwer herzustellen ist, empfiehlt Hering, nur die weiße Hälfte zu konstruieren, und diese vor einem lichtlosen Hintergrunde zu beobachten. Alle Apparate von Hering sind bei Rothe (Leipzig) erhältlich.

Bourdon(2), S. 118ff.) hat darauf hingewiesen, daß bei solchen Vergleichen zweier sehr kleiner Strecken die verschiedene Helligkeit der Objekte eine große Rolle spielt. Um diesen Faktor zu eliminieren, brachte Bourdon zwei sehr kurze, feine, von hinten durchleuchtete Spalte, welche um ein geringes an Länge differierten, zunächst auf gleiche Helligkeit. Dies läßt sich z. B. dadurch kontrollieren, daß sie, durch ein graues Glas (eine verschleierte photographische Platte) betrachtet beide zusammen in gleicher Entfernung vom Beobachter unsichtbar werden. Sodann suchte Bourdon den Abstand vom Auge auf, in welchem die verschiedene Länge der beiden Strecken eben noch erkannt wurde.

II. Untersuchung der optischen Lokalisierung nach Höhe und Breite.

Vorbemerkungen.

Die Dimensionen des subjektiven Sehraumes, in welchem uns die Gesichtsempfindungen erscheinen, sind mit den Dimensionen des objektiven, wirklichen Raumes (im Sinne Herings, R. S. 344) nicht direkt vergleichbar. Wir können zwar zu einer gegebenen Strecke eine andere suchen, welche uns gleich lang erscheint, aber wir erhalten dadurch kein objektives Maß für die subjektive Streckenlänge. Wir können demnach im Gebiete des optischen Raumsinnes bloß einen Vergleich anstellen zwischen der Anordnung der Objekte (nach Größe, Form und Lage) im wirklichen Raum und der Anordnung der Sehdinge im subjektiven Sehraume. Eine bevorzugte Stellung nimmt ein der Vergleich der Anordnung der Objekte relativ zur wirklichen Stellung des Kopfes und der Augen mit der Anordnung der Sehdinge relativ zur vermeintlichen Lage des Kopfes und der Augen — Lokalisation der scheinbaren Medianebene, der scheinbaren Augenhöhe (des sogen. subjektiven Horizonts) usf.

Endlich können wir zur Kontrolle der optischen Lokalisation noch heranziehen unsere Fertigkeit, die Lage oder Richtung der Objekte mit der Hand anzugeben. In diesem Falle handelt es sich darum, eine unter der Leitung des Gesichtssinnes eingeübte Innervation ohne Leitung des letzteren aus dem Gedächtnis zu reproduzieren. Es ist daher selbstverständlich, daß diese Innervationen den individuellen optischen Verhältnissen in hohem Grade angepaßt sind.

Verlagern wir durch optische Hilfsmittel die Netzhautbilder anhaltend in bestimmter Weise, so paßt sich die Innervation beim Greifen und Tasten den geänderten Verhältnissen allmählich an. Wir sehen dies bei geübten Mikroskopikern, welche das Objekt, dessen verkehrtes Bild sie sehen, bei beabsichtigten Bewegungen mit der Hand in entgegengesetzter Richtung verschieben, als sie es sehen; ferner bei allen Bewegungen der Tiefe nach, die vor einem Spiegel ausgeführt werden, welche Anpassung anscheinend (nach dem Referat) von Stratton[98c]) sehr weit getrieben worden ist. Experimentell kann man solche Anpassungen des aktiven Tastens und sonstiger Bewegungen an geänderte Abbildungsverhältnisse ferner herbeiführen durch längeres Tragen von Prismen, welche die Bilder beider Augen gleichmäßig nach einer bestimmten Richtung hin verschieben, etwa beide nach rechts oder beide nach links (vergl. Helmholtz, O. S. 745, Donders[176]), S. 20ff. neuerdings Reddingius[92]). Die weitestgehende Anpassung nach dieser Richtung hat Stratton[98a,b]) vollzogen. Er trug während mehrerer Tage vor seinem rechten Auge (bei verdecktem linken) eine Röhre mit einer bildumkehrenden Linsenkombination, so daß also rechts und links oben und unten vertauscht erschien. Über Nacht wurden die Augen lichtdicht abgeschlossen und früh vor dem Öffnen derselben die Linsenkombination vorgebunden. Die letztere bestand im Prinzip aus zwei starken Konvexlinsen gleicher Brennweite, welche um die doppelte Brennweite voneinander abstanden, so daß sie zusammen ein verkehrtes, aber gleich großes Bild der Gegenstände

lieferten. Bei der Ausführung wurden statt je einer starken je zwei dünnere, dicht nebeneinander befindliche Konvexlinsen verwendet. Größe und Brennweite der Linsen wurden so gewählt, daß sich ein Gesichtsfeld von 45° Ausdehnung ergab. Das Messingrohr mit den Linsen war in einer mit Tuch gefütterten Gipsmaske befestigt, welche so geformt war, daß beide Augen (das linke war durch die Maske ganz verdeckt) nicht gedrückt wurden und frei beweglich waren.

Allgemeines zur Methodik.

Die Lokalisation der Sehdinge im Sehraum hängt in erster Linie (aber nicht ausschließlich) ab von der Lage der Netzhautbilder der zugehörigen Objekte. Beim Vergleich der Anordnung der Objekte und der Sehdinge muß daher selbstverständlich die Abbildung der Objekte auf der Netzhaut möglichst genau definiert werden. Dazu ist notwendig die Bestimmung der Lage von Objekt und Auge und die Kenntnis der dioptrischen Verhältnisse des Auges. Den letzteren legen wir dabei das Listingsche Schema des reduzierten Auges zugrunde.

Um die Augen in meßbarer Lage zu fixieren, benutzen wir Kopfhalter, die je nach der erforderten Genauigkeit verschieden sind: Für einfachste Versuche genügt ein bogenförmig gekrümmter Stirnhalter, der an einem Stativ befestigt ist. Zuverlässiger wird die Fixierung, wenn man den Stirnhalter mit einer Kinnstütze, wie sie bei den Perimetern gebräuchlich ist, kombiniert.*) Am sichersten geht man, und dies ist für alle feineren Versuche unerläßlich, wenn man den Kopf nach Helmholtz (O. S. 657 und 659) durch Einbeißen in ein sogenanntes „Beißbrettchen“ feststellt. Dazu verwendet man ein flaches, zwischen die Zahnreihen passendes Bogenstück aus starkem Zinkblech, das mittels eines flachen Fortsatzes an Stativen befestigt werden kann (Abbildungen solcher Beißbrettchen finden sich in den Figuren 7, 48 usf.). Das Bogenstück wird oben und unten dick mit warmem Siegellack oder besser mit in warmem Wasser erweichter Stentmasse (Stent's composition) der Zahnärzte überzogen. Dann beißt man möglichst symmetrisch (unter Kontrolle vor dem Spiegel oder durch eine andere Person) in die weiche Masse ein und läßt erkalten. Das Beißbrettchen wird dann mit dem Stiel an Haltern, in Schlittenführungen usf. angebracht. Sobald man in den früheren Abdruck der Zahnreihe hineinbeißt, ist der Kopf mit hinreichender Genauigkeit fixiert**). In der folgenden Darstellung werden wir verschiedene derartige Kopfhalter mit Beißbrettchen, welche für spezielle Zwecke konstruiert sind, zu besprechen haben. Die wichtigsten sind die von Hering[3]), Donders[303]), Sachs und Wlassak[96]), sowie der von A. v. Tschermak[101]) angegebene Universalkopfhalter, welcher meßbare Verstellungen des Kopfes nach verschiedenen Richtungen, sowie die Einstellung der horizontal-frontalen Drehungsachse auf die äußeren Augenwinkel gestattet, von welcher aus dann der Objektabstand gemessen wird.

Ist die Lage des Fixationspunktes gegeben und damit bei einer bestimmten festen Kopfstellung auch die Richtung der Gesichtslinie relativ

*) Einfache Kopfhalter findet man im Katalog von Spindler und Hoyer (Göttingen).

**) Daß alle solchen Fixationsvorrichtungen ganz kleine Bewegungen des Kopfes nicht verhindern können, hat C. Du Bois-Reymond[170]), S. 433) durch direkte Beobachtungen erhärtet. Indessen sind diese kleinen Verschiebungen bei den meisten Versuchen nicht weiter störend (vgl. jedoch unten S. 207 ff.).

zur Orbita fixiert, so entspricht dieser Lage nach dem Donderschen Gesetze auch eine bestimmte Orientierung der Längs- und Querschnitte der Netzhaut. Erfordert der Versuch die Kenntnis der Orientierung der Netzhaut, so hat man von der Primärstellung des Kopfes und der Augen auszugehen. Über deren Definition, Aufsuchung und Reproduktion vergleiche unten S. 192ff. Wo eine solche Bestimmung nicht nötig ist, läßt man den Beobachter gerade vor sich hin auf eine ebene frontale Fläche blicken.

Die Lokalisation des Netzhautbildes eines beobachteten Objekts kann wesentlich dadurch beeinflußt werden, daß im Gesichtsfelde noch andere Dinge sichtbar sind. Um den Einfluß derartiger, neben der „Hauptreizung" einhergehenden „optischen Nebenreizungen" auszuschließen, wird man das Beobachtungsobjekt dem Auge in einem sonst möglichst gleichförmigen Gesichtsfelde darbieten. Die ideale Form dafür ist ein Dunkelzimmer, in welchem lediglich die betreffenden Versuchsobjekte so schwach leuchtend sichtbar sind, daß sie den Raum nicht merklich erhellen. Meist genügt es aber schon, wenn um den Fixationspunkt herum in möglichst großer Ausdehnung ein gleichmäßiger ebener Grund vorhanden ist, eine einfarbige Wand, oder eine große einfarbige Scheibe, deren Ränder durch die sogleich zu besprechenden Abblendevorrichtungen verdeckt sind. Man hat zu beachten, daß auf den sonst gleichmäßigen Grund nicht etwa Schatten von der Versuchsanordnung oder den Versuchspersonen fallen. Ferner verhüte man durch Beleuchtung von zwei Seiten her, daß die Helligkeit der Fläche nicht etwa nach einer Seite zu gleichmäßig abnimmt, weil dadurch bei einäugiger Beobachtung eventuell eine falsche Tiefenauslegung (scheinbare Neigung der Fläche) zustande kommen könnte, und infolgedessen auch eine veränderte Lokalisierung der Netzhautbilder nach der Breite (siehe Hering, R. S. 368).

Als Abblendevorrichtung benutzt man ein kurzes Rohr (z. B. aus mattschwarzer Pappe), dessen Durchmesser so groß ist, daß der Beobachter sein ganzes Gesicht hineinstecken kann. Das Rohr wird in passender Höhe in einem Halter befestigt, der aus einem am Tische angeschraubten Holzbrett mit kreisförmigem Ausschnitt improvisiert werden kann, in welchen die Röhre hineingesteckt wird. Man mache die Röhre so kurz als möglich (am besten aus zwei ausziehbaren Stücken), so daß die Konturen ihres distalen Endes bei Betrachtung der Gegenstände in der Mitte des Gesichtsfeldes auf recht peripheren Netzhautpartien abgebildet werden und überdies bei Akkommodation auf die ferner gelegenen Untersuchungsobjekte recht verwaschen erscheinen. Am proximalen Ende besitzt die Röhre zweckmäßig zwei seitliche vorspringende Lappen, welche die Schläfen decken. Zur Sicherheit kann man noch ein Tuch über den Kopf schlagen.

A. Lokalisation im ebenen Sehfelde bei aufrechter Kopfhaltung und bei Ausschluß von Nebenreizen.

a) Wahrnehmung einfachster Formen und Lokalisierung von Richtungen.

I. Wahrnehmung der geraden Richtung.

Lange gerade Linien, welche auf einer zur Gesichtslinie senkrechten Ebene durch den Fixationspunkt verlaufen, erscheinen meist als Gerade, und

nur manchen Personen bei Fixation mit einem Auge schwach gekrümmt, vermutlich wegen beträchtlicher Schiefstellung der Hornhaut (v. Recklinghausen,[91]), S. 134; Berthold,[67]), S. 140). Ausnahmsweise kann sogar ein vertikaler Strich, sobald er im Fixationspunkt durch eine Horizontale geschnitten wird, an der Schnittstelle geknickt erscheinen (Berthold, l. c. S. 138 ff.). Über die Messung des Knickungswinkels siehe unten S. 120.

Seitlich vom Fixationspunkt verlaufende lange gerade Linien erscheinen bei ruhendem Blick gekrümmt mit der Konkavität gegen den Fixationspunkt zu (Hering, R. S. 370; Helmholtz, O. S. 693 ff.).

1. Man betrachte (ohne Brille!) bei fester einäugiger Fixation zwei lange, zu beiden Seiten des Fixationspunktes verlaufende schwarze Striche auf einer hellen Wand, oder man beuge sich soweit über einen schwarzen Tisch, daß man keine sonstigen, deutlich erkennbaren Geraden mehr im Gesichtsfelde hat und fixiere die Mitte eines langen weißen Papierstreifens.

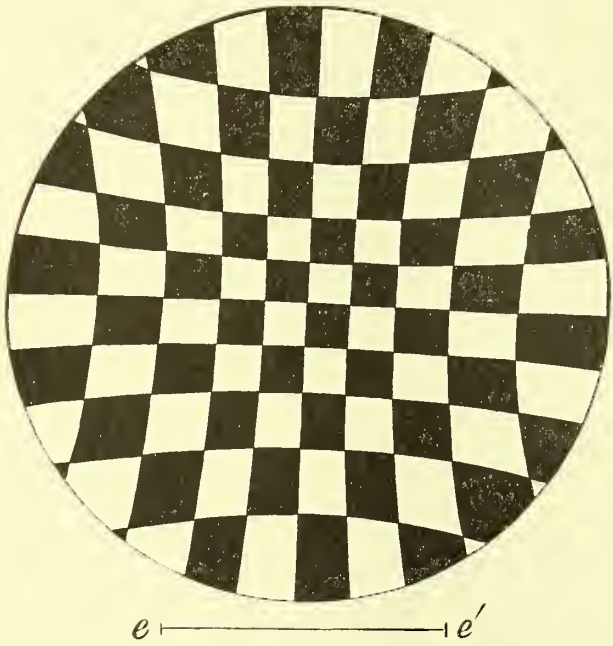


Fig. 3.
Nach Helmholtz (O. S. 695).

2. Man fixiere eine auf dunklem Grunde gerade vor dem Auge befindliche Marke a. Zwei kleine weiße Flecke (Papierschnitzelchen) b und c bringe man so an, daß man sie stark indirekt sieht und suche nun ein weißes Scheibchen d (an schwarzem Stiele) so zu legen, daß es in einer Geraden mit bc erscheint. d liegt dann nicht auf der geraden Verbindungslinie bc, sondern näher gegen den Fixationspunkt zu (Helmholtz, l. c.; Fischer[72b]), S. 83; ähnlich Bourdon, siehe unten). Andere Versuche bei Helmholtz, l. c.

Um über die Kurven, welche im indirekten Sehen als Gerade erscheinen, Aufschluß zu erhalten, projizierte Helmholtz jene „Richtkreise des Blickfeldes“ (O. S. 651 ff.), welche mit der durch den Fixationspunkt gehenden Vertikalen und Horizontalen gleiche Richtung haben, auf eine Ebene. Sie erscheinen dann als Hyperbeln, welche miteinander ein Gitter bilden. Damit sie im indirekten Sehen möglichst deutlich sichtbar werden, machte er die Felder des Gitters schachbrettartig abwechselnd schwarz und weiß. Fig. 3 gibt das Muster in verkleinertem Maßstabe wieder. Bei fester Fixa-

tion des Mittelpunktes der senkrecht zur Gesichtslinie gestellten Tafel erschienen nun Helmholtz aus einer bestimmten Entfernung, die durch Nähern und Entfernen des Kopfes gefunden werden kann, die schwarz-weißen Felder als Quadrate, die Hyperbeln als Linien, welche wenigstens in der Fläche des Sehfeldes nicht gekrümmt sind. Die Entfernung, aus der man sie so sieht, entspricht bei Helmholtz für den größten Teil des Gesichtsfeldes der Augendistanz, für welche die Figur konstruiert ist. In Fig. 3 ist diese Distanz, in gleichem Maßstabe wie das Muster verkleinert, durch e e′ wiedergegeben. Behufs Wiederholung des Versuchs vergrößere man die Figur durch Projektion auf Zeichenpapier, auf dem man die Linien nachzieht. Am vollkommensten gelingt der Versuch, wenn man sich unter steter Fixation des Mittelpunktes der Tafel ein kräftiges Nachbild erzeugt und dies bei geschlossenen Lidern gegen helles Licht gewendet betrachtet.

Eine andere Versuchsanordnung zur Entscheidung der Frage, ob die Helmholtzschen Richtkreise des Blickfeldes als Gerade gesehen werden, verwendete Küster[81]). In einem von Donders angegebenen Apparate, dem Zykloskop, wird dem in Primärstellung fixierenden Auge im Dunkelzimmer eine auf einem Kreisbogen liegende Reihe von leuchtenden Punkten (elektrische Funkenstrecken) sichtbar gemacht. Der Kreisbogen, auf welchem die Lichtpunkte angebracht sind, entspricht bei Fixation seiner Mitte einem größten Kreise durch ein kugeliges Blickfeld, dessen Zentrum im Drehpunkte des Auges liegt. Er ist um eine durch den Okzipitalpunkt verlaufende horizontale Achse drehbar, wobei der Radius des Kreisbogens konstant bleibt. Der Beobachter hatte zu beurteilen, ob ihm die Lichtpunkte bei indirekter Betrachtung in gerader Linie zu liegen schienen oder nicht. Bezüglich der Detailausführung muß auf das Original verwiesen werden. Man vergleiche auch die Kritik von Hering (R. S. 370, Anm. 3), welcher zum strengen Nachweis der Helmholtzschen Angabe eine Untersuchung nach der Methode der mittleren Fehler fordert. Würde man die oben unter 2 erwähnte und von Bourdon tatsächlich hierfür (allerdings meist binokular, siehe unten) benutzte Methode anwenden, so könnte man wenigstens feststellen, ob die drei Punkte in den hyperbolischen „Richtlinien“ liegen — falls die Genauigkeit der Lokalisation im indirekten Sehen überhaupt hierzu ausreicht.

Führt man bei fixiertem Kopfe monokular den Blick rasch einer geraden Linie entlang, welche sich ziemlich weit seitwärts vom primären Blickpunkt befindet, so erscheint die Linie infolge der nach dem Listingschen Gesetze auftretenden Rollung um die Gesichtslinie konkav gegen den primären Blickpunkt zu. Seitwärts gelegene Linien von entsprechend großer konvexer Krümmung gegen den primären Blickpunkt müssen demnach dem rasch an ihnen entlang bewegten Blick als Gerade erscheinen. Man vergleiche diesbezüglich Hering (R. S. 536 ff.) u. Helmholtz (O. S. 695).

Bis zu welchem Betrage herab an kurzen, durch den Blickpunkt laufenden Linien Abweichungen von der Geraden, Knickungen oder Krümmungen, bei bewegtem Blick erkannt werden, hat Guillery[74]) untersucht. Er beobachtete aus einer Entfernung von 1 m einen scharfen, schwarzen, 15 cm langen Strich auf weißem Grunde, der sich gerade vor seinen Augen befand, und an dessen Ende ein zweiter ebensolanger angesetzt war, welcher um einen bestimmten Winkel von der Richtung des ersten abwich. Der eben erkennbare Knickungsgrad ist abhängig von der Schenkellänge des Knickungswinkels. Legt man über beide Schenkel ein Stück Papier mit einem dreieckigen Ausschnitt (FDE in Fig. 4), so daß zunächst nur eine ganz kurze Strecke HBG sichtbar bleibt, so sind Knickungen geringen Grades

unmerklich. Verlängert man jetzt beide Schenkel des Knickungswinkels gleichzeitig um gleiche Beträge, indem man die Spitze des dreieckigen Ausschnittes der Linie BD entlang führt, so wird von einer bestimmten Länge der Schenkel an die Kniekung merklich. In ähnlicher Weise bestimmte Guillery die eben merkliche Krümmung von Kreisen verschiedener Radien, indem er zunächst nur einen ganz kurzen Bogen des Kreises sichtbar ließ, und ihn dann so lange weiter aufdeckte, bis die Krümmung eben merklich wurde. Bourdon(2), S. 96 ff.) bestimmte den mittleren Fehler, den er machte, wenn er im Dunkelzimmer einen leuchtenden Punkt in die gerade Verbindungslinie zweier anderer einzustellen versuchte. Die leuchtenden Stellen waren Löcher von 2 mm Durchmesser in schwarzem Papier, mit Ölpapier überzogen und von hinten durch ein in ein Pappkästchen eingeschlossenes Licht erhellt, die aus einer Entfernung von 2 m binokular mit fixiertem Kopfe betrachtet wurden. Die beiden seitlichen Punkte waren fix, der mittlere längs einer zur geraden Verbindungslinie der beiden seitlichen senkrechten Mm-Skala verschieblich. Die Versuche wurden mit geradeaus oder seitwärts gewendetem Blick, unter fester Fixation des mittleren verschieblichen Punktes oder mit wanderndem Blick, endlich auch im indirekten Sehen (siehe oben!) ausgeführt.

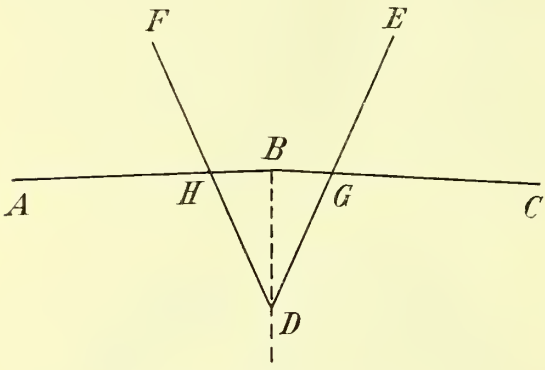


Fig. 4.
Nach Guillery(74), S. 475.)

2. Erkennen des rechten Winkels.

Ob ein geometrisch genau konstruierter rechter Winkel bei Fixation seines Scheitels in Primärstellung auch als rechter gesehen wird, entscheidet die Beobachtung eines rechtwinkligen Kreuzes auf gleichmäßigem Grund. Durch Drehung des Kreuzes um seinen Mittelpunkt kann man den Einfluß der Neigung der Schenkel auf die Größe der eventuellen Abweichung feststellen. Zur genaueren Messung eignen sich die im nächsten Abschnitte angeführten Vorrichtungen mit drehbarem Faden, dessen Einstellung an einem Gradbogen abgelesen werden kann.

Einer ganz einfachen Anordnung zur Messung der als rechte erscheinenden Winkel bei Horizontalstellung des einen Schenkels (und damit zugleich des Betrages der bei ihm vorhandenen scheinbaren Kniekung der Vertikalen im Fixationspunkte, siehe oben S. 118), bediente sich Berthold(67), S. 187 ff.). Er schnitt aus Pappe die Form eines Uhrpendels aus, ließ aber an Stelle des scheibenförmigen Gewichtes nur einen Ring stehen, über welchen er in der Längsrichtung des Pendels einen Faden spannte (vergl. Fig. 5). Das obere Ende des Pendels wurde mit einer Nadel an einer senkrechten Wand derart

befestigt, daß es um die Nadel als Achse nach rechts und links gedreht werden konnte. An der Wand war ein horizontaler Faden so ausgespannt, daß er bei vertikaler Lage des Pendels den Faden über dem Kreisausschnitte in zwei Hälften teilte. Durch Verschieben des Pendels konnte dann der vertikale Faden um meßbare Winkel soweit gedreht werden, bis entweder die beiden Winkel in den unteren Quadranten, oder die beiden oberen als rechte erschienen.

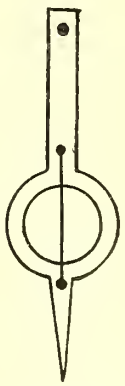


Fig. 5.
Nach Berthold[67], S. 139).

3. Lokalisierung der horizontalen und vertikalen Richtung.

Da bei Ausschluß von Nebenreizungen die Wahrnehmung der vertikalen und horizontalen Richtung an die Reizung von Netzhautelementen mit unveränderlicher gegenseitiger Anordnung gebunden ist (Herings Längs- und Querschnitte der Netzhaut), so muß bei diesen Versuchen außer auf die Lage der Versuchsobjekte relativ zur Gesichtslinie auch noch auf die „Orientierung" der Netzhaut Rücksicht genommen werden, also eine etwaige Rollung der Augen um die Gesichtslinie als Achse beachtet werden. Eine solche Rollung kann durch Drehung des Kopfes um eine sagittale Achse — gleichsinnige Rollung beider Augen — oder durch einen auf beide Augen einwirkenden Fusionszwang — gegensinnige Rollung der Augen — ausgelöst werden. Halten wir den Kopf aufrecht und schalten wir den Fusionszwang aus, so stellen sich bei den meisten Menschen beim Blick in die Ferne die Gesichtslinien beider Augen nicht genau parallel ein, und damit kann auch eine Rollung eines oder beider Augen um die Gesichtslinie als Achse verbunden sein. Bei Konvergenzeinstellung der Gesichtslinien erfolgt ferner auch beim Ausschluß des Fusionszwanges eine gegensinnige Rollung beider Augen.

Für genauere Untersuchungen ist es demnach geboten, auch bei der Untersuchung jedes Auge für sich die Stellung des anderen Auges zu kontrollieren. Man benutzt hierzu jene haploskopischen Einrichtungen, die für die Untersuchung der Netzhautkorrespondenz verwendet werden. Da sich diese beiden Anordnungen fast decken, so ist es einfacher und zweckmäßiger, die Untersuchung der Lagebeziehung der Längs- und Querschnitte in einem Auge bei der Primärstellung zusammen mit der Untersuchung der Netzhautkorrespondenz zu besprechen.

Um die Lage der scheinbaren Horizontalen und Vertikalen bei Sekundärstellungen des Auges zu bestimmen, hielt Hering[3], S. 255) vor das Gesicht — Helmholtz (O. S. 753) vor ein Auge — einen Zylinder von etwa 12—15 cm Länge. Über seine distale Öffnung war ein diametraler Faden gespannt, dessen Mitte durch einen Knoten markiert war. Der Zylinder wurde drehbar in einen zweiten hineingesteckt, und der Beobachter hatte die Aufgabe, bei einäugiger Fixation des Knotens vor einem ganz gleichmäßigen Grunde den Faden durch Drehen des Zylinders horizontal, bezw. vertikal zu stellen. Die Augenstellung kann durch Vorwärts- oder Rückwärtsneigung des Kopfes und durch Rechts- und Linkswendung der Röhre variiert werden. Seitliche Neigung des Kopfes ist zu vermeiden.

Verwendet man, wie dies schon Hering (l. c.) vorschlägt, eine Linie mit markiertem Mittelpunkt auf einer drehbaren Scheibe, trifft also etwa eine Anordnung wie die im folgenden beschriebenen von Peirce und Jastrow, aber für monokulare Betrachtung, sorgt für Fixation des Kopfes und definiert die Kopfstellung gut, indem man von der Primärstellung ausgeht, so kann man auch genaue Messungen ausführen. Eine andere Methode siehe bei Helmholtz (O. 754).

Die Genauigkeit der Einstellung der scheinbaren Horizontalen und Vertikalen kann entweder mit monokularer Beobachtung untersucht werden, wobei aber der Sicherheit wegen eine Fixierung der Augenstellung durch Fusionszwang in einer haploskopischen Vorrichtung erwünscht ist. Versuchsanordnungen demnach, wie S. 137 ff. Wesentlich einfacher gestaltet sich die Untersuchung bei binokularer Betrachtung eines drehbaren geraden Striches auf sonst gleichmäßigem Grunde. Der Beobachter blickt durch eine geschwärzte Pappröhre (siehe oben S. 117) auf eine kreisrunde drehbare Scheibe, durch deren Mittelpunkt ein diametraler feiner Strich gezogen ist, und deren zentrale Drehungsachse sich in Augenhöhe, in der Medianebene und in bequemer Sehweite vor dem Beobachter befindet. Die Drehung der Scheibe wird mittels einer über Rollen laufenden und um die Drehungsachse der Scheibe geschlungenen Schnur vom Beobachter selbst besorgt*). Die Einstellung der Linie wird auf der Rückseite an einer Gradteilung, längs welcher ein an der Achse angebrachter Zeiger spielt, von einem anderen abgelesen. Eine Genauigkeit der Winkelablesung von $^1/_{10}{}^0$ ist vollkommen ausreichend. Eine solche Anordnung benutzte Peirce[90]). Jastrow[78]) hatte vorher schon mit der unten S. 128 beschriebenen Anordnung binokulare Einstellungen der scheinbaren Horizontalen und Vertikalen und der Neigung von 45^0 ausführen lassen.

4. Optische Lokalisierung der Medianebene und der Horizontalebene der Augen (des „subjektiven Horizontes").

Zur Bestimmung der scheinbaren Medianebene bedienten sich Sachs und Wlassak[96]) folgender Methode: Der Versuchsperson wurde im Dunkelzimmer bei fixiertem Kopf (Beißbrettchen) eine vertikale leuchtende Linie**) auf kurze Zeit sichtbar gemacht. Die Versuchsperson hatte durch verabredete Klopfsignale (Sprechen mußte vermieden werden, um eine Kopfbewegung auszuschließen) anzugeben, ob ihr die Linie rechts, links oder median zu liegen schien. Die Stellung des Spaltes und die Aussage wurden dann notiert.

Die Einrichtung für die verschiebliche Leuchtlinie war folgende: „Über einem Würfel aus glattpoliertem Holz erhob sich ein Schlot aus geschwärzter Pappe, auf dessen einer Wand ein Holzrahmen angebracht war. In den Holzrahmen war ein geschwärztes Stahlblech eingefügt, in den ein Spalt von 0,5 mm Breite und 120 cm Länge eingeschnitten war. Die Ränder des Spaltes waren zugeschärft, so daß seine Breite auch bei seitlicher Betrachtung nicht merklich verändert schien. Um die Spaltlippen in einer Ebene zu erhalten, war er in Abschnitten von je 15 cm durch Brücken von

*) Feiner kann die Einstellung durch Zahnräder besorgt werden.

**) Leuchtende Linien werden rascher und prompter lokalisiert als bloße Leuchtpunkte.

je 0,5 mm Länge unterbrochen. Stand der Holzwürfel auf einer horizontalen Fläche, so war der Spalt objektiv vertikal. Genau unter dem Spalt war ein Zeiger an dem Holzwürfel angebracht, der die Lage des Spaltes auf einem untergelegten Papierstreifen zu markieren gestattete". Der Spalt wurde von zwei auf einer Eisenstange verschieblichen Glühlampen beleuchtet. Um die Beleuchtung möglichst gleichmäßig zu machen, war zwischen Lampen und Spalt ein mit Schreibpapier überzogener Rahmen eingeschoben.

Um den Einfluß seitlicher Kopfwendungen auf die Lokalisation der Medianebene feststellen zu können, wurde ein Kopfhalter verwendet, welcher die Winkelgröße der Seitenwendung abzulesen gestattete. Ein Holzring (a in Fig. 6) von 23 cm Durchmesser und 2,5 cm Breite trägt an einem Steg b das Zahnbrettchen c. Der Steg ladet an der Stelle, wo er das Zahnbrettchen trägt, nach vorne aus, damit der Holzring nicht ins Gesichtsfeld kommt. Das Zahnbrettchen ist in einer Führung nach vorn und hinten verschieblich und kann durch eine Flügelschraube festgestellt werden. Der Holzring trägt an seinem oberen Rande eine 5 cm breite, innen rauhe, mit einer Flügelschraube versehene Rohrspange e. In diese paßt ein spulrunder Holzstab d von 3,5 cm Durchmesser. Der Holzring läßt sich einerseits in sagittaler Richtung verschieben, andererseits um den Stab als Achse drehen und in jeder Stellung durch Anziehen der Flügelschraube arretieren. Das hintere, dem Stativ zugewendete Ende des Holzstabes ist an einem starken queren Holzstücke h so befestigt, daß es um eine vertikale Achse gedreht werden kann. Das Ausmaß der Drehung ist an einer Winkelteilung in Graden ablesbar. „Jede dem beweglichen Teil des Apparates gegebene Stellung kann durch Anziehen einer Klemmschraube fixiert werden. Das quere Holzstück, in dem das Achsenlager für die vertikale Achse liegt, ruht mit seinen Enden derart in einer horizontalen Gabel g, daß es um eine frontale Achse gedreht werden kann. Das hintere Ende der Gabel ist um eine sagittale Achse drehbar. Durch Verstellen an den beiden letztgenannten Achsen ist es möglich, die Achse f genau vertikal zu stellen. Es kann dies dadurch geprüft werden, daß bei vertikaler Stellung der Achse f ein an dem Holzstab d über dem Zahnbrettchen angebrachtes Lot bei jeder dem Stab erteilten Lage eine mit der Wasserwage geprüfte horizontale Ebene eben berühren muß." Durch Verschieben des Rings a auf dem Holzstab kann jene Stellung des Kopfes aufgesucht werden, bei welcher er sich zwanglos bewegt. Das hintere Ende der Gabel ist an einem massiven Stativ, das Hebung und Senkung des Kopfhalters gestattet, befestigt. Mehrere, in der Zeichnung nicht angegebene Verstärkungen verhinderten nach Tunlichkeit das Federn des Apparates.

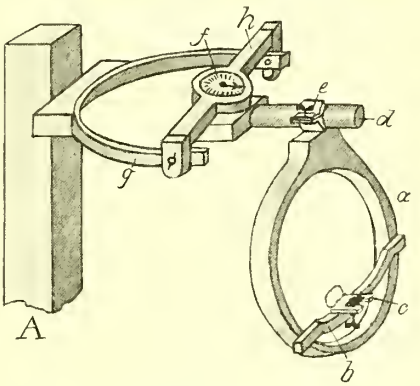


Fig. 6.
Nach Sachs und Wlassak(96), S. 26).

Im wesentlichen nach derselben Methode, unter Benutzung eines mit Ölpapier überzogenen, von hinten durchleuchteten Spaltes in schwarzem Karton, der in einem graduierten Schlitten nach rechts und links verschoben werden konnte, hat auch Bourdon[2]) die scheinbare Medianebene, und mit derselben, nur entsprechend abgeänderten Anordnung die Einstellung einer Leuchtlinie in scheinbar gleiche Höhe mit den Augen bestimmt. Ganz analoge Bestimmungen des „subjektiven Horizonts" wurden gleichzeitig auch von Mc Dougall[82]) ausgeführt.

Zur Bestimmung der scheinbaren Medianebene in verschiedenen Entfernungen vom Auge insbesondere an Schielenden mit gestörter Netzhautkorrespondenz hat v. Tschermak[100]) folgende Anordnung im Hellzimmer angegeben. Der Kopf des Beobachters wird durch das Beißbrettchen G in Fig. 7 fixiert. Parallel zur Frontalebene befindet sich in variabler Entfernung eine wagrechte Schlittenführung. Der

Schlitten kann mittels eines Zahnrades mit Trieb fein abgestuft bewegt werden. „Die Drehung des Zahnrades geschah durch einen Schnurlauf, der um eine größere feste Rolle stark rechts vom Beobachter herumlief. An dieser konnte bis zu 75 cm Beobachtungsabstand der Beobachter selbst mit der rechten Hand angreifen. In größerer Entfernung besorgte dies ein Gehilfe. Der Schlitten trug auf einem Säulchen eine 5 cm lange, ca 0,5 mm dicke, berußte Nadel (St. N. in Fig. 7), welche genau lotrecht aufgestellt war.“ Die Enden der Nadel sowie die ganze Schlittenführung waren durch den Karton A, welcher einen wagrechten 2,5 cm hohen und 53 cm breiten Ausschnitt hatte, verdeckt. 18 cm hinter der Schlittenführung stand dieser parallel eine lotrechte,

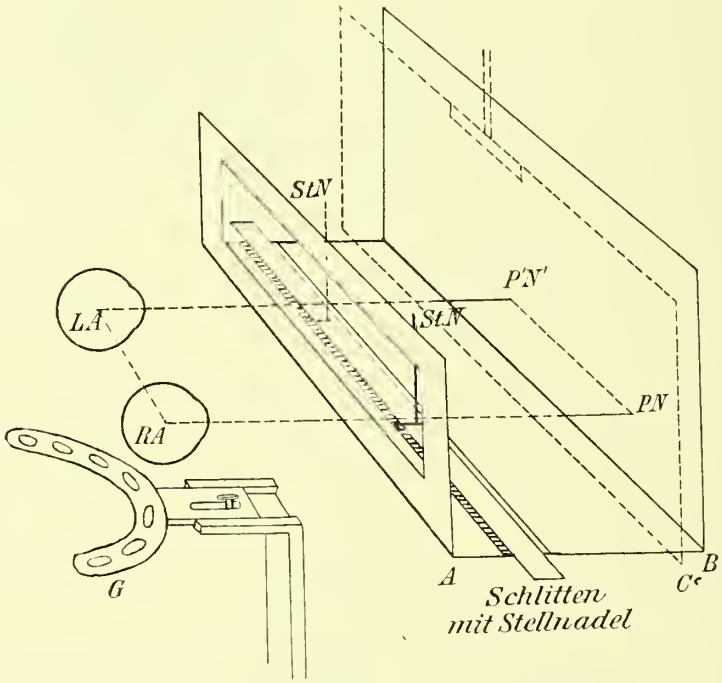


Fig. 7.
Nach v. Tschermak(100), S. 10).

weiß überzogene Wand B. In dieser waren in Augendistanz nebeneinander zwei Nadeln („Punktnadeln“ PN und P'N' in Fig. 7) senkrecht zur Wandfläche eingelassen. Der Gebißhalter und der Apparat wurden zu Beginn des Versuchs so gegeneinander orientiert, daß der Beobachter mit jedem Auge eine der beiden Nadeln PN und P'N' in totaler Verkürzung sah. Dann war die Gesichtslinie des jeweils fixierenden Auges wagrecht geradaus gerichtet und traf die Hinterwand, und damit auch die Ebene in welcher die Stellnadel bewegt wurde, senkrecht. An der Schlittenführung befand sich eine Mm-Skala, am Schlitten eine Strichmarke. Jene Teilstriche der Skala, an welchen diese Marke beim Verschieben der „Stellnadel“ bis genau vor eine der beiden „Punktnadeln“ zu stehen kommt, bezeichnet die Schlittenstellungen, bei der die Stellnadeln gerade vor dem rechten oder linken Auge stehen, die Mitte zwischen den beiden ergibt die Einstellung der Nadel in der wirklichen Medianebene. Nach vollendeter Justierung des Apparates werden die beiden „Punktnadeln“ durch weißen Karton (C in Fig. 7) verdeckt und nun auf gleichmäßigem Grunde vom Schielenden unter fester Fixation abwechselnd mit dem einen und dem anderen Auge die scheinbare Medianebene eingestellt.

b) Vergleich von Längen bei Ausschluß von Nebenreizen. „Ausfüllung des blinden Fleckes".

Die Technik Volkmanns[6]) beim Vergleichen zweier durch Fäden abgegrenzter Streckenlängen ist schon oben S. 114 angegeben worden. In einem anderen Falle[102b]) verschob er an einem noniusartigen Instrumente einen Strich mittels Mikrometerschraube derart gegen zwei andere, daß die von den letzteren abgegrenzte Strecke in beliebigem Verhältnis geteilt wurde. Fechner (Psychophysik, Bd. 1, S. 211 ff.) stellte von zwei Zirkeln, welche bis auf ihre Spitzen verdeckt waren, den einen auf eine bestimmte Distanz ein und suchte dann den Spitzen des anderen dieselbe Distanz zu geben. In ähnlicher Weise halbierte Kundt([80]), S. 127) in einem besonderen Apparate, in welchem geschwärzte Spitzen, nach Art eines Stangenzirkels verschieblich, allein in einem Spalt sichtbar waren, während die ganze übrige Einrichtung mit weißem Karton abgedeckt war, eine horizontale Strecke bei festgestelltem Kopf und unter einäugiger Fixation der teilenden Spitze. Die Versuchseinrichtung wurde von Münsterberg[88]), R. Fischer[72a]) und Tschermak[101]) modifiziert, von letzterem in folgender Weise: Auf einer großen vertikalen mattschwarzen Scheibe ist als Fixationspunkt eine Nadel angebracht, welche dem fixierenden Auge in totaler Verkürzung erscheinen muß. Auf beiden Seiten vom Fixationspunkt lassen sich mittels mattschwarzer Führungsstangen, welche sich möglichst wenig vom Scheibengrund abheben, weiße Scheibchen verschieben. Bei der Messung wird das eine Scheibchen fest eingestellt, und das andere so lange verschoben, bis es gleichweit vom Fixationspunkt abzustehen scheint, wie das erste. Die Scheibe ist längs einer Gradteilung drehbar, so daß man auch beliebige schräge und den vertikalen Meridian der Netzhaut untersuchen kann*).

Während in den bisher erwähnten Versuchen leere durch zwei markierte Endpunkte begrenzte Strecken miteinander verglichen wurden, führten Higier[77]) und Merkel[84]) den Längenvergleich mit besonderen Apparaten, bezüglich welcher auf die Originale verwiesen werden muß, an geraden Strichen einer Richtung aus.

Um Längen verschiedener Richtung, vertikale und horizontale, miteinander zu vergleichen, ordneten Darwin und Rivers[71]) die zu vergleichenden Strecken als Schenkel eines rechten Winkels an und variierten mittels einer einfachen Vorrichtung die Länge des einen Schenkels so lange, bis beide gleich erschienen.

Ein Brett von 25 cm Seitenlänge ist vorn mit schwarzem Tuch überzogen. In das Brett werden 3 feine Löcher gebohrt in der Weise, daß sie in den 3 Ecken eines gleichseitigen rechtwinkligen Dreieckes liegen. Die beiden Schenkel des rechten Winkels werden durch 2 Fäden gebildet, welche durch die entsprechenden Löcher durchgesteckt sind und auf der Rückseite mittels einer Spiralfeder, welche ihre Enden verbindet, stets gespannt erhalten werden. Jeder Faden ist zur Hälfte weiß, zur anderen Hälfte schwarz gefärbt. Mittels eines zylindrischen Griffes, der sich auf der Rückseite befindet, kann man vorn ein beliebig langes weißes Stück des Fadens sichtbar machen. Das schwarze Stück ist auf dem schwarzen Tuch fast unsichtbar. Die Länge der weißen Fäden wird an der Mm-Teilung eines Winkels abgelesen. Eine andere Versuchsanordnung benutzten Hicks und Rivers[76]); vergl. auch Fischer[72a]).

*) Als „Streckentäuschungsapparat" von Polikeit in Halle zu beziehen. Man vergl. auch den „Distanzvariator" nach Chaym im Katalog von Spindler u. Hoyer (Göttingen).

Eine Übersieht über die Lokalisation naeh allen Netzhaut-Meridianen gleiehzeitig erhält man, wenn man auf einer vertikal gestellten großen sehwarzen Seheibe eine im Zentrum angebrachte horizontale Nadel derart fixiert, daß man sie in totaler Verkürzung sieht und nun 8—16 ausweehselbare weiße Seheibchen an sehwarzen radiären Trägern so lange versehiebt, bis sie seheinbar in einen Kreis angeordnet sind (Tsehermak[101]).

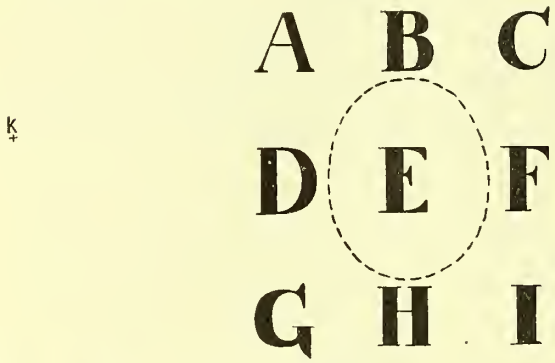


Fig. 8.
Aus Helmholtz (O., S. 723).

Einen Vergleieh zwisehen der Größensehätzung direkt und indirekt gesehener Streeken hat

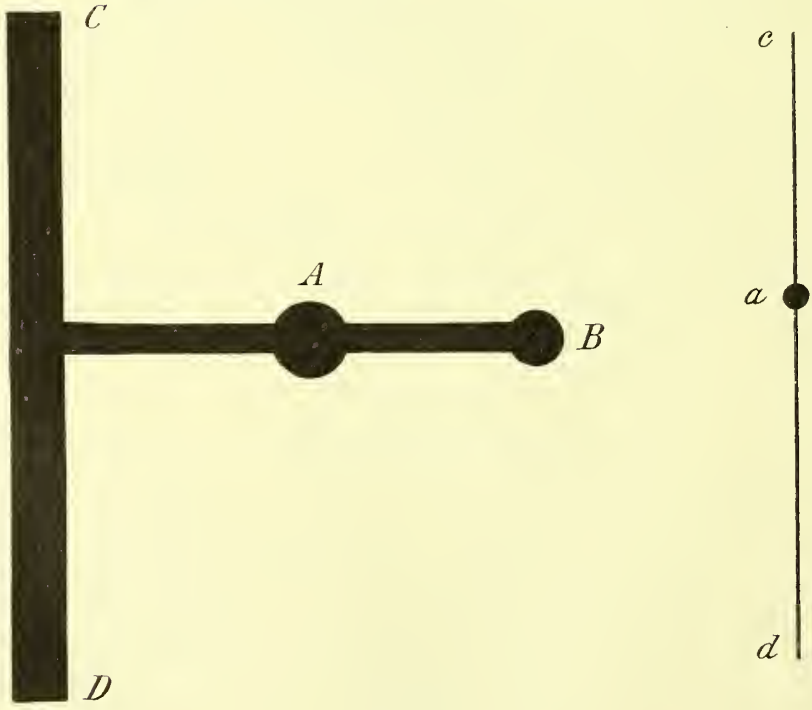


Fig. 9.
Aus Hering(3), S. 22).

Guillery[73]) in der Weise ausgeführt, daß er im Zentrum eines Sehweiggersehen Perimeters (mit einer gleiehmäßig grauen Fläehe als Hintergrund) einen weißen Karton mit einem sehwarzen Strieh von

bestimmter Länge einstellte. In beliebiger Entfernung vom Zentrum wurde am Perimeterbogen ein weißer Karton mit einem längeren, dem mittleren parallelen, schwarzen Striche angebracht, welcher durch einen weißen Kartonschieber verdeckt war. Während nun der Beobachter den mittleren Strich (mit an ihm entlang wanderndem Blick) betrachtete, wurde der Kartonschieber soweit abgezogen, bis der periphere Strich gleich lang erschien wie der zentrale.

Bezüglich der Frage nach der Lokalisation in der Nähe des blinden Flecks seien hier nur zwei schlagende Versuche angeführt. 1. Volkmann[102a] (modifiziert von Helmholtz O. 723) setzte 9 Buchstaben (oder verschiedenfarbige Oblaten) wie in Fig. 8 in ein Quadrat und fixierte mit dem rechten Auge das Kreuzchen bei k aus einer Entfernung, bei welcher gerade der mittlere Buchstabe E auf den blinden Fleck fiel. Dadurch daß man ein gestieltes Scheibchen auf E legt und es nach allen Seiten vorschiebt, bis es eben anfängt, sichtbar zu werden, kann man kontrollieren, daß kein anderer Buchstabe mitverdeckt wird.

2. Man fixiert mit dem linken Auge zunächst den Fleck a in Figur 9 und bringt das Papier in eine solche Lage, daß der Fleck A auf den blinden Fleck fällt. Dann macht man sich durch Wanderung des Blicks in der Richtung e d den Fleck A wieder sichtbar und vergleicht die scheinbare Entfernung zwischen dem Flecke B und dem Streifen C D in beiden Fällen (Hering[3], S. 22).

Eine große Anzahl weiterer Versuche findet man bei Volkmann[102a] und Wittich[104].

c) Vergleich von Lagen, Richtungen und Winkeln. Gedächtnis für Richtungen und Längen.

Die Genauigkeit des Sukzessivvergleichs der Lage einzelner Punkte untersuchte Bourdon([69]; [2], S. 159), indem er den Beobachter im Dunkelzimmer einen leuchtenden Punkt (Funkenstrecke eines Induktionsapparates) 4—5″ lang binokular fixieren ließ und ihm nach einem leeren Intervall von 2—3″ (während dem die Augen geschlossen, eventuell willkürliche Augenbewegungen ausgeführt wurden) einen anderen Leuchtpunkt, der meßbar nach der Höhe, Breite oder Tiefe verschoben war, sichtbar machte. Der Beobachter hatte anzugeben, ob und nach welcher Richtung die Lage des zweiten Punktes von der des ersten abwich.

Den Grad der Genauigkeit der Lokalisation eines indirekt gesehenen Objektes bestimmte Morrey[85] in der Weise, daß er sogleich nach dem vorübergehenden Auftauchen des indirekt gesehenen Objektes einen direkt betrachteten Gegenstand an den scheinbaren Ort des indirekt gesehenen brachte. Während er im Dunkelzimmer in Primärstellung einen leuchtenden Punkt (einen Fleck von Leuchtfarbe) mit fixiertem Kopfe monokular betrachtete, ließ ein Gehilfe an einer peripher gesehenen Stelle einen elektrischen Funken überspringen. Fixationspunkt und Funkenstrecke befanden sich an einer vertikal vor dem Beobachter aufgestellten Papierfläche. Unmittelbar nach dem Überspringen des Funkens wurde das Zimmer soweit erhellt, daß die vertikale Papierfläche und die Spitze eines vom Beobachter gehaltenen Stabes eben sichtbar wurden, und der Beobachter gab

dann mit dem Stabe die Stelle an, wohin er den Funken lokalisiert hatte. Um zu vergleichen, wie groß die Genauigkeit der Lagebestimmung eines direkt fixierten Punktes in solchen Versuchen ist, wurde eine zweite Versuchsreihe in der Weise ausgeführt, daß der Beobachter die Stelle erst angab, nachdem er zur Fixation des peripher auftauchenden leuchtenden Punktes (hergestellt durch eine Anzahl aufeinander folgender elektrischer Funken) übergegangen war.

Zum Vergleich von Richtungen stellte Mach[83]) zwei drehbare schwarze Scheiben nebeneinander auf. Auf jeder war ein vom Zentrum ausgehender weißer Faden ausgespannt, der sich bei Drehung der Scheibe mit drehte. Der eine Faden wurde in eine bestimmte Richtung eingestellt und dem Beobachter aufgegeben, dem zweiten Faden dieselbe Richtung zu erteilen. An einer während des Versuchs verdeckten Kreisteilung wurde dann die Lage der beiden Fäden abgelesen.

Halbierungen von Winkeln nach dem Augenmaß führte R. Fischer[72b]) aus. Er zeichnete auf einer vertikalen schwarzen Tafel einen Kreis mit Gradteilung auf, und markierte die Schenkel des Winkels durch drehbare, vom Mittelpunkte des Kreises ausgehende Fäden. Über einen ähnlichen Vergleich von Winkelgrößen, wobei die Versuchsperson drei durch radiär ausgespannte Fäden markierte Winkel mit demselben Scheitelpunkt so einzustellen hatten, daß der Unterschied zwischen dem kleinsten und dem mittleren gleich erschien der Differenz zwischen dem mittleren und dem größten, berichtet Witasek[103]).

Zu Untersuchungen des Gedächtnisses für Winkel und Richtungen ließen Jastrow[78]), Bihler[68]), Richter und Wamser[93]) ihre Versuchspersonen Winkel, welche ihnen 5—15″ lang vorgezeigt wurden, einfach nachzeichnen (ähnlich Seyfert[97]): Nachzeichnen von Dreiecken, für deren rasche Herstellung ein eigener Apparat angegeben ist). Um bei diesen Versuchen den Einfluß sonstiger Geraden im Gesichtsfelde auszuschalten, benutzte Jastrow ferner folgende Einrichtung. Auf einem vertikalen schwarzen Schirme waren untereinander zwei weiße kreisrunde Kartonscheiben befestigt, auf denen je ein durch das Zentrum verlaufender schwarzer Strich gezeichnet war. Die Scheiben waren um eine horizontale Achse drehbar und die Neigung des schwarzen Strichs konnte auf der Rückseite des Apparates an einer Gradteilung abgelesen werden. In der Mitte zwischen den beiden weißen Scheiben befand sich eine größere schwarze, welche nach Belieben hinauf- oder herabgeklappt werden konnte und so abwechselnd die obere oder untere weiße Scheibe verdeckte. Alles Seitenlicht wird von den Augen des Beobachters abgeblendet. Auf der verdeckten unteren Scheibe wird nun zunächst eine bestimmte Neigung der Linie eingestellt, und diese dann dem Beobachter einige Zeit hindurch sichtbar gemacht. Durch Herunterklappen der mittleren Deckscheibe wird dann das Vorbild verdeckt, und der Beobachter hat die Linie auf der oberen Scheibe durch Drehung derselben, die mittels eines Schnurlaufs bewerkstelligt wird, in die gleiche Stellung zu bringen.

Mit welcher Genauigkeit man eine bestimmte Länge (50 mm) frei aus dem Gedächtnis reproduzieren kann, hat von Kries[79]) in zweierlei Weise untersucht. In einer Versuchsreihe bezeichnete er die Endpunkte der Strecke

mit Bleistift auf Papier, in der zweiten verschob er einen leicht gleitenden Schieber mit einer feinen, auf weißem Grunde allein sichtbaren Spitze zwischen einem festen und einem beliebig verstellbaren Anschlag (beide unsichtbar!) hin und her, und gab dem zweiten Anschlage eine solche Stellung, daß die Exkursion nach dem Augenmaß 50 mm betrug (die Endpunkte der Strecke sind dabei nicht markiert).

B. Der Einfluß von Kopf- und Körperhaltung auf die optische Lokalisation.*) Beeinflussung der Größenschätzung durch die Lage der Blickebene.

Beobachtet man im sonst vollkommen dunklen Raume eine schwach leuchtende vertikale Linie (einen schwach glühenden Platindraht oder einen schmalen, mit Ölpapier überzogenen, von hinten durchleuchteten Spalt in einer drehbaren Metallscheibe) mit stark seitlich geneigtem Kopfe, so erscheint sie schief (Aubert[66]); Mulder[86]); Nagel[89]). Man kann die Erscheinung auch im Hellen sehen, wenn man sorgfältig alle Anhaltspunkte für die Beurteilung der wirklichen Vertikalen ausschaltet. Nagel (l. c. S. 396) schloß zu diesem Zwecke ein Auge und brachte vor das andere eine undurchsichtige Kapsel, welche vor dem Kornealscheitel eine glattrandige runde Öffnung von 1 mm Weite besaß. Blickt man hierdurch gegen eine helle Wand, auf welcher sich eine vertikale Linie befindet, so erscheint diese schief, wenn man den Kopf stark nach der Seite neigt. Sowie Gegenstände von bekannter Lage sichtbar werden, tritt das Phänomen schwächer oder gar nicht mehr auf.

Um den Betrag der Ablenkung zu messen, ermittelten Sachs und Meller[94]) im Dunkelzimmer bei verschiedenen Neigungsgraden des fixierten Kopfes die Richtung, welche eine Leuchtlinie einnehmen muß, damit sie vertikal erscheint. Der mittels Beißbrettchens fixierte Kopf konnte um eine sagittale Achse, welche mit der Längsachse des Beißbrettchens zusammenfiel, gedreht werden. Der Drehungsgrad wurde an einer Gradteilung abgelesen. Vor dem Beobachter befand sich eine Lichtlinie, welche in einer frontalen Ebene um meßbare Beträge gedreht werden konnte.

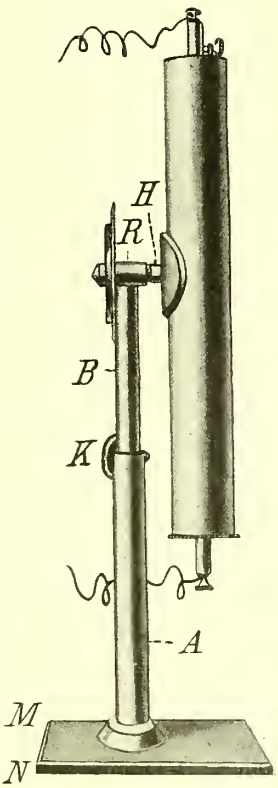


Fig. 10.
Nach Sachs und Meller[94]), S. 390).

Die Vorrichtung war im einzelnen folgendermaßen beschaffen. In der Mitte einer viereckigen Metallplatte, MN in Figur 10, ist ein vertikaler Hohlstab A angebracht. In das Lumen dieses Stabes paßt ein massiver runder Stab B hinein, an dessen Ende sich ein starker

*) Die unter dem Einfluß von Kopf- und Körperbewegungen, z. B. bei Rotationen, erfolgenden Änderungen der optischen Lokalisierung werden hier, als ganz in ein anderes Gebiet gehörig, übergangen.

Ring R zur Aufnahme der horizontalen Achse H befindet. Der Ring und damit die Achse können durch Verschiebung des massiven Stabes B gehoben bezw. gesenkt, und durch Anziehen der Klemmschraube K in jeder Stellung festgehalten werden. Die etwa fingerdicke Achse trägt an dem, dem Beobachter zugekehrten Ende ein 30 cm langes, 5 cm im Durchmesser haltendes geschwärztes Kupferrohr, das zur Aufnahme der Lichtquelle, einer Glühlampe mit geradem Kohlenfaden, dient. Aus dem Zylinder kann Licht nur durch einen vorn angebrachten geradlinigen Spalt von $^3/_4$ mm Breite austreten, der von innen her mit Ölpapier verdeckt ist. In den Strom wurde ein so großer Widerstand vorgeschaltet, daß die Linie eben genügend hell erschien, ohne doch andere Objekte sichtbar zu machen.

Sobald der Beobachter seinen Kopf fixiert hatte, ließ ein Gehilfe unmittelbar nach einem verabredeten Signal die Lichtlinie kurze Zeit aufleuchten. Durch vorher verabredete Klopfzeichen gibt der Beobachter an, ob ihm die Linie im Momente des Aufblitzens vertikal oder geneigt erschien. Die Angabe und die Stellung der Linie wird registriert*), und der Versuch bei einer anderen Neigung der Linie wiederholt. Diese Methode der „Aufblitzversuche" wurde gewählt, weil das Urteil unbestimmter wurde, wenn die Linie länger im Gesichtsfelde blieb.

Um den Einfluß der Kopf- und Körperneigung auf die Richtung der scheinbaren Vertikalen gesondert zu bestimmen, lagerten Sachs und Meller[95]) die Versuchsperson auf ein großes um eine sagittale Achse drehbares Brett in der Weise, daß der Körper mittels breiter Bänder angeschnallt wurde und in die Füße auf einer am unteren Ende des Brettes senkrecht abgehenden Holzplatte aufruhten. Die Drehungsachse entsprach etwa der Höhe des Kreuzbeins. „Durch seitlich an dem Brette angebrachte Ringe waren Seile gezogen, mittels deren das Brett in jeder beliebigen schrägen Stellung festgehalten werden konnte. Ein an dem Brette angebrachtes Lot spielte an einer Kreisteilung und gestattete die Bestimmung der Neigung des Brettes". Die oben beschriebene Lichtlinie war in 2 m Entfernung vor dem Beobachter am Brette befestigt. Da sie bei der Neigung des Lagerbrettes mitgeneigt wurde, wurde bei jeder neuen Lage ihre wirkliche Vertikalstellung durch Lotung bestimmt, und dann durch „Aufblitzversuche" die scheinbare Vertikale.

Die Untersuchung des Einflusses seitlicher Kopfwendung auf die scheinbare Lage der Medianebene siehe oben S. 123.

Nach Stroobant[99]), Zoth[105]) und anderen, denen allerdings Bourdon([70] und [2]), p. 415ff.) widerspricht, wird die Längenschätzung beeinflußt durch die Lage der Blickebene. Eine und dieselbe Strecke soll bei Betrachtung mit erhobenem Blick kleiner erscheinen, als bei horizontal geradaus gerichtetem Blick.**) Quantitativ untersucht wurden die Verhältnisse zuerst durch Stroobant[99]) mit einer Versuchsanordnung, welche später von Müller[87]) in folgender Weise wieder aufgenommen wurde: In einem dunklen Saale werden

*) Zur raschen Feststellung der Lage der Leuchtlinie diente eine in Figur 10 weggelassene Markiervorrichtung, bestehend aus Nadeln, welche gegen einen Papierstreifen vorgedrückt werden konnten.

**) Zoth erklärte (ebenso wie Stroobant) mit daraus das Größererscheinen des Mondes am Horizonte. Ferner gibt er im Anschluß an Helmholtz und Filehne eine einfache Anordnung an, um mittels einer frei aufgehängten großen Spiegelglasplatte den hochstehenden Mond so zu spiegeln, daß er am Horizonte erscheint.

aus einer Entfernung von 10 m zwei durch je 2 Lichtpunkte (rasch nacheinander überspringende elektrische Funken) begrenzte Strecken auf scheinbar gleiche Länge gebracht, von denen sich die eine in Augenhöhe befindet, die andere eine Erhebung der Blickebene um 30° erfordert. Der Abstand der beiden in Augenhöhe fest aufgestellten Lichtpunkte voneinander betrug 20 cm. Die beiden oberen Lichtpunkte waren an einem Maßstabe angebracht, der eine fest, der andere auf einem mit Nonius versehenen beweglichen Schieber. Guttmann[75]) verglich am Perimeter monokular die Distanzen je zweier schwarzer Striche bei horizontaler und bei um 40° gehobener Blickebene miteinander. Die zwei verschieblichen schwarzen Striche auf weißem Grund waren die geschwärzten einander zugewendeten scharfen Kanten zweier weißer Pappstreifen, welche in einem degenscheidenartigen Rahmen, dessen Vorderfläche in ihrer ganzen Länge einen 2 cm hohen Spalt frei ließ, verschoben werden konnten. Der obere Schieber wurde fest eingestellt, die Striche am unteren (horizontal gesehenen) Schieber wurden so lange verstellt, bis sie den gleichen Abstand voneinander zu haben schienen, wie die oberen.

Bei der Versuchsanordnung von Bourdon([70 und 2]), S. 417) wurde die Einstellung des oberen und unteren Objekts auf scheinbar gleiche Größe durch Änderung des Abstandes desselben vom Auge herbeigeführt. Als Beobachtungsobjekte benutzte Bourdon im Dunkelzimmer zwei kreisrunde, von hinten durchleuchtete Papierscheiben — Fenster in Pappkästen, in welchen sich ein Licht befand (vergl. oben, S. 120). Die Pappkästen waren auf zwei Schienen befestigt, welche in einem beim Beobachter befindlichen Scharnier gelenkig miteinander verbunden waren, so daß der Winkel zwischen den Blickrichtungen für das Zentrum beider Scheiben beliebig verändert und an einer Gradteilung abgelesen werden konnte. Die obere Scheibe wurde in 2 m Entfernung vom Auge fest eingestellt, die untere mittels eines Schnurlaufs auf der Schiene so lange genähert, bezw. entfernt, bis sie bei monokularer (oder auch bei binokularer) Betrachtung gleich groß erschien, wie das obere.

C. Einfluß von optischen Nebenreizen auf die Lokalisierung von Richtungen und auf die Schätzung von Längen.

Sind neben dem Hauptreiz im Gesichtsfelde noch andere Konturen vorhanden, so können Änderungen der Lokalisation der Richtung von Linien und der Größenschätzung von Winkeln und Abständen auftreten, welche gewöhnlich unter die „geometrisch-optischen Täuschungen“ eingerechnet werden. Zur Demonstration derselben genügt es in der Regel, die zu untersuchenden Objekte mitten auf einer gleichmäßigen Fläche anzubringen, weil schon durch die überwiegende Einstellung der Aufmerksamkeit auf das direkt Gesehene der Einfluß indirekt gesehener Dinge genügend abgeschwächt wird. Für gewisse Versuche ist dagegen die Einschränkung des Gesichtsfeldes in der oben S. 117 angegebenen Weise nötig.

Die bekanntesten und am meisten untersuchten dieser geometrisch-optischen Täuschungen sind folgende:

1. die Zöllnersche Figur[143]), [144]), in welcher eine Anzahl paralleler gerader Striche („Hauptlinien“), welche von kurzen, schrägen Strichen („Nebenlinien“) geschnitten werden, eine scheinbare Abweichung vom Parallelismus zeigen. Sind die Hauptstriche recht breit, so beobachtet man

auch eine scheinbare noniusartige Verschiebung der beiden Hälften der schrägen Nebenlinien gegeneinander. Diese Teilerscheinung, die man auch an jeder Einzelzeichnung einer durch einen breiten langen Strich unterbrochenen schrägen Linie beobachten kann, wird als Poggendorffsche Täuschung bezeichnet (Zöllner wurde von P. darauf aufmerksam gemacht[143]), S. 501). Die Zöllnersche und die P.sche Täuschung illustrierende Figuren findet man in jedem größeren Lehr- und Handbuche (vergl. z. B. Wundt[7]), S. 571; Zoth[8]), S. 385). Wenn man die Zöllnersche Figur dreht, so tritt bei Schräglage der Hauptlinien die Zöllnersche, bei vertikaler und horizontaler Lage derselben die P.sche Täuschung in den Vordergrund. Betrachtung mit bewegtem Blick verstärkt die Täuschung, dabei treten Scheinbewegungen auf, die von Helmholtz (O. S. 712) und Pierce[136]) genauer studiert wurden. Die Täuschung bleibt, aber in vermindertem Ausmaß, bestehen bei fester Fixation, bei Momentanbeleuchtung und im Nachbild. Witasek[141]) und Benussi[107]) erzeugten die Zöllnersche Figur durch binokulare Vereinigung, indem sie unter Zuhilfenahme besonderer Einrichtungen im Heringschen Haploskop dem einen Auge die Hauptlinien, dem anderen die Nebenlinien boten. Nach beiden Autoren bleibt sie dabei abgeschwächt bestehen, nach Lehmann[126]) verschwindet sie bei exakter binokularer Vereinigung im Prismenstereoskop (vergl. dazu Benussi, Zeitschr. f. Psych. 41, I, S. 201). Nach Lehmann (l. c.) ist die Z.sche und P.sche Täuschung einzig und allein auf Irradiation zurückzuführen. Sie verschwinden vollständig, wenn man Grund und Figur in verschiedenen Farben von genau gleicher Helligkeit ausführt.

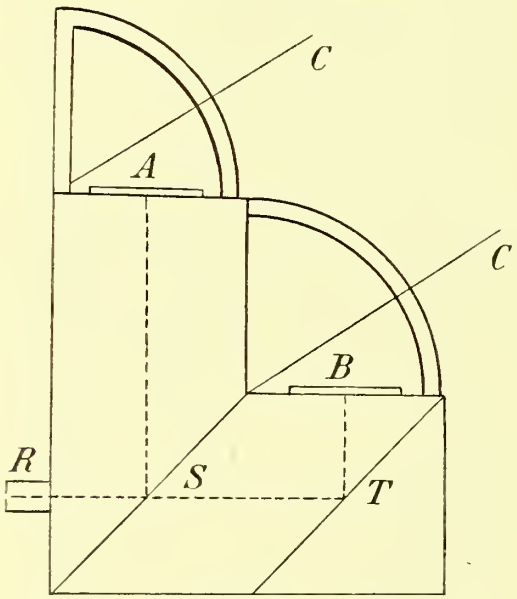


Fig. 11.
Nach Lehmann([126]), S. 90).

Um dies bequem zeigen zu können, bediente er sich des in Figur 11 schematisch dargestellten Apparates. „Er besteht aus einem hölzernen, im Innern schwarz gestrichenen Kasten, wie zwei Stufen einer Treppe geformt. Die Höhe und die Länge sind 25 cm. S und T sind zwei Spiegel, genau parallel unter einem Winkel von 45° gestellt; T ist ein gewöhnlicher silberbelegter Spiegel, S ein grünes Glas oder eine Spiegelglasplatte, die an der unteren Seite eine mit Anilinfarbe grün gefärbte Schicht von Lederkollodion trägt. Bei A und B sind Öffnungen, ca 7 cm im Quadrat, durch Glasplatten gedeckt, welche mit gefärbtem Kollodion überzogen sind; die Platte A ist rot oder gelb, die Platte B blau oder grün. C C sind weiße Schirme, die um eine Achse am unteren Rande gedreht und in jeder beliebigen Stellung mittels Schrauben an Kreisbögen fest-

gestellt werden können. R ist ein kurzes Rohr mit Okularöffnung. Der Apparat wird so gestellt, daß das durchs Fenster kommende Licht von den Schirmen C C auf die A und B reflektiert wird; dadurch werden die Öffnungen mit verschiedenfarbigem Licht beleuchtet, und das durch R blickende Auge sieht in S und T Spiegelbilder der beiden Öffnungen. Wenn nun die Entfernung A S genau gleich S T + T B ist, decken sich die beiden Bilder, und man sieht ein quadratisches Feld in der Mischfarbe des von A und B kommenden Lichtes. Legt man aber auf B ein photographisches Negativ, Schichtseite nach oben, und auf A ein nach dem Negativ hergestelltes Diapositiv, Schichtseite

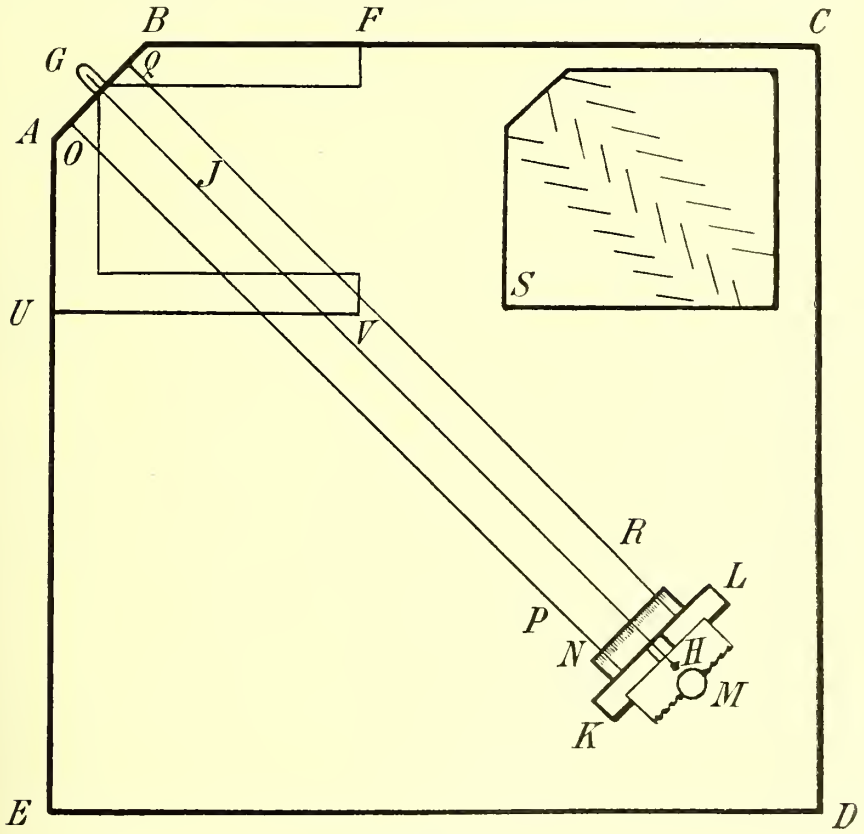


Fig. 12.
Nach Heymans[118], S. 102).

nach unten, so kann man durch Verschiebungen der Platte leicht erzielen, daß die beiden Bilder sich decken. Zeigt das Negativ bei B helle Linien auf dunklem Grunde, so werden diese also blau oder grün gesehen; das Diapositiv bei A läßt aber nur durch den die Linien umgebenden Grund Licht durch, und wenn die Spiegelbilder sich decken, sieht man also die grünen Linien auf rotem oder gelbem Grund. Je höher die Schirme C C gestellt werden, um so mehr Licht reflektieren sie nach A und B; durch Drehung derselben kann man es also leicht dahin bringen, daß Zeichnung und Grund genau dieselbe Helligkeit haben."

Quantitative Untersuchungen über den Zöllner-Effekt hat Heymans[118]) mit einem Apparate angestellt, der folgendermaßen eingerichtet war: „Ein quadratisches, nur links oben schief abgeschnittenes Holzbrett von 50×50 cm, A B C D E in Figur 12,

trägt an der Rückseite einen Metallstreifen GH, der um einen Punkt I drehbar ist. Die (in der Figur allein sichtbaren) beiden Enden des Streifens sind rechtwinklig nach oben umgebogen; das eine ragt links oben, das andere durch einen schmalen Ausschnitt KL über das Brett hervor; beide sind durch einen nahe an der Oberfläche des Brettes gespannten Gummifaden G H miteinander verbunden. Wird also der Metallstreifen um seinen Befestigungspunkt I gedreht (wozu derselbe bei H mit einem gezahnten Metallstück verbunden ist, auf welches der Knopf M mittels eines Zahnrades wirkt), so führt der Gummifaden eine gleiche Drehung aus, deren Größe man auf einer in mm eingeteilten Metallplatte N ablesen kann. Deckt sich der Gummifaden mit dem Nullpunkte der Teilung, so ist seine Richtung mit derjenigen zweier anderer Gummifäden O P und Q R, welche in verschiedener Entfernung (2, 2·5, 3 und 3·5 cm) von dem mittleren Faden unbeweglich ausgespannt werden können, genau parallel. Die linksoberen Teile dieser drei Fäden vertreten die Hauptlinien einer Zöllnerschen Figur; die Querstriche zu dieser Figur sind in verschiedenen Größen, Richtungen und Entfernungen auf weißen Kartonblättern S gezeichnet, welche in einen dünnen auf das Brett befestigten Metallrahmen F B A U V unter die Hauptlinien hineingeschoben werden". Während der Versuche wurden diejenigen Teile der Fäden, welche außerhalb der Figur liegen, durch einen Deckel aus schwarzem Karton abgedeckt. „Die Versuche werden nun so eingerichtet, daß, nachdem ein bestimmtes Kartonblatt eingeschoben war, der mittlere Faden zuerst nach der einen, dann nach der anderen Seite möglichst weit aus der Mittelstellung entfernt wurde und die Versuchsperson jedesmal durch Drehung des Knopfes M die Parallelität der drei Fäden wiederherzustellen suchte. Die Abweichung wurde in mm, senkrecht zur Normallage der Fäden, abgelesen; der so erhaltene Betrag, durch die konstante Entfernung des Drehpunktes vom Mittelpunkte der Einteilung dividiert, ergab die Tangente des Drehungswinkels. . . ."

Anstatt die mittlere Hauptlinie einer seitlichen parallel zu stellen, hält es Benussi[107]) für zweckmäßiger, sich bloß einer einzigen Kolumne des Zöllnerschen Musters, bestehend aus einer einzigen Hauptlinie und den sie schneidenden schrägen Nebenlinien, zu bedienen und die Ablenkung der Hauptlinie dadurch zu messen, daß man an das obere Ende derselben einen schwarzen Faden auf gleichmäßigem Grunde ansetzt, und sein freies Ende so lange verschiebt, bis er scheinbar die gerade Verlängerung der Hauptlinie darstellt. In dem von Benussi konstruierten Apparate wird die Einstellung des Fadens vom Beobachter selbst mittels eines über Rollen geführten Schnurlaufes besorgt. Benussi untersuchte dabei hauptsächlich den Einfluß der Farbe auf die Größe der Täuschung.

Quantitative Untersuchungen über die Poggendorffsche Täuschung — durch Verschieben eines Kartons, der die eine Hälfte der „Nebenlinie" trug, bis zur Einstellung auf scheinbare Verlängerung der Richtung der fixen anderen Hälfte — führten Thiéry[139]), Judd[122]) und Pierce([137]), S. 259) aus. Pierce machte in einer zweiten Versuchsanordnung den die Nebenlinie tragenden Karton auch drehbar, so daß er auch eine scheinbare Winkeländerung ausgleichen konnte. Einen komplizierteren Apparat zur Messung verwendete Burmester([114]), S. 360ff.).

Vielfache Modifikationen der Poggendorffschen Figur zum Zwecke der Analyse finden sich bei Judd[122]), Blix[110]) usf. Die Literatur über die Zöllner-Poggendorffsche Täuschung bis zum Jahre 1899 ist zusammengestellt bei Witasek[141]). Nachträge für die späteren Jahre bei Benussi (Zeitschr. f. Psychol. Bd. 34, S. 310, 1904 und ebenda Bd. 43, I, S. 303, 1906).

An das Zöllnersche Muster reihen sich an: die Täuschungsfiguren von Hering([3]), S. 74ff.; eine davon abgebildet bei Zoth[8]), S. 384, Fig. 66; Wundt[7]), S. 553); die „verschobene Schachbrettfigur" Münsterbergs[131]), studiert von Pierce[135]), Benussi-Liel[108]) und Lehmann[126]) usf. Eine bemerkenswerte Abänderung der Poggendorffschen Figur von Delboeuf[115]) (Abbildung bei Zoth[8]), S. 385, Figur 67 links) wurde genauer studiert von Burmester[114]).

2. Die Müller-Lyersche Figur[129 130]) (vergl. Figur 13, A und B), deren beide Vergleichsstrecken von Brentano[112]) getrennt wurden, „optisches Paradoxon". Wurde quantitativ untersucht von Heymans[117]), welcher die zwei Teile der ursprünglichen Müller-Lyerschen Figur auf verschiedene Kartons aufzeichnete. Der Karton A in Figur 13, welcher die eine Hälfte der Figur trägt ist fest auf der linken Seite des Kartonrahmens abe aufgeklebt, der Karton B mit der anderen Hälfte der Figur ist nach rechts und links verschieblich. Der Beobachter hat die Aufgabe, ihn so lange zu verschieben, bis ihm die beiden Vergleichsstrecken auf A und auf B gleich lang erscheinen. Zur Messung diente die Mm-Teilung unter a und über b, welche während des Versuchs durch die zuklappbaren Kartondeckel d und e verdeckt wurde. In dieser Weise wurden auch zahlreiche Modifikationen der Figur untersucht. Die quantitativen Untersuchungen von Berrettoni[109]) kenne ich nur aus dem Referat. Über die Herstellung der Figur durch Stereoskopie vergl. Exner (Zentralbl. f. Physiol. Bd. 12, S. 901).

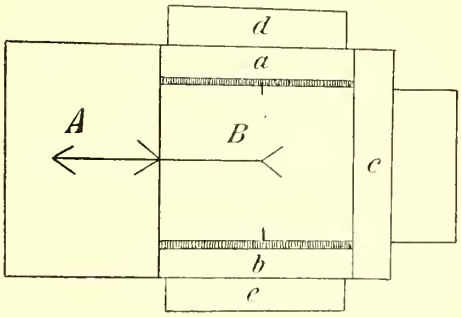


Fig. 13.
Nach Heymans([117]) S. 223).

3. Die Täuschung nach Oppel([133b]), S. 35) und Hering([3]), S. 68): Geteilte Strecken, Winkel, Quadrate erscheinen größer als ungeteilte gleich große. Quantitative Untersuchungen über den Betrag der Täuschung bei geteilten Strecken führten Kundt[80]) mit der oben S. 125 erwähnten Einrichtung aus, ferner Aubert([1]), S. 266) mit parallelen Linien. Knox[124]) ließ den Beobachter eine punktierte Linie auf weißem Karton einer in der geraden Verlängerung derselben gegebenen Distanz von 2 Punkten gleich lang machen.

Fig. 14.
Nach Loeb([128]), S. 513).

Für die bisher beschriebenen Täuschungen nimmt Einthoven[116]) als mitbestimmend an die mangelhafte Sehschärfe im indirekten Sehen, welche einen ähnlichen Einfluß auf die Lokalisation nehmen soll, wie unscharfe Abbildung. Zur Illustrierung photographiere man nach ihm die Figuren in Zerstreuungskreisen, oder betrachte sie durch eine nicht genau eingestellte Lupe (Lehmann[126])).

Anscheinend verwandt mit der Oppel-Heringschen Täuschung ist

4. die Loebsche Täuschung[128]). Auf einer ebenen Fläche befindet sich seitlich ein zur Medianebene M in Figur 14 paralleler Streifen a b (von steifem Karton). Der Beobachter hat die Aufgabe, bei fixiertem Kopf einen zweiten Kartonstreifen c d so hinzulegen, daß er über einen leeren Zwischenraum hinweg die Verlängerung der Richtung von a b angibt. Legt man dann neben c d einen dritten parallelen e f hin, so wird der Beobachter die Einstellung von c d nicht mehr richtig finden. Befindet sich e f (wie in der

Figur) näher zur Medianebene als c d, so muß e d, um wieder als Fortsetzung von a b zu erscheinen, gegen die Medianebene verschoben werden. Legt man e f weiter nach rechts als c d, dann wird c d ebenfalls mehr nach rechts gesehoben.*) Im gleichen Sinne wie hier die Breitenwerte werden übrigens in einem ganz analogen Versuche mit horizontalen Streifen auch die Tiefenwerte verändert (verschiedene Einstellung des zweiten Streifens, je naehdem ob sieh vor oder hinter ihm ein dritter befindet).

Quantitative Untersuchungen über die Loebsche Täuschung stellte Heymanns([118]), S. 129) mit einem Apparate an, der auch die quantitative Untersuehung der Zöllnersehen Täuschung unter den gleiehen, einfachsten Bedingungen, und somit einen unmittelbaren Vergleich beider gestattet.

„Ein starkes Brett von 82×55 em trägt nahe am Oben- und am Untenrande schmale Metallreifen A B und C D (vergl. Fig. 15), auf welehen in der Mitte eine Mm-Teilung und weiter nach beiden Seiten in Entfernungen von 1 cm kleine stehende Metallstifte

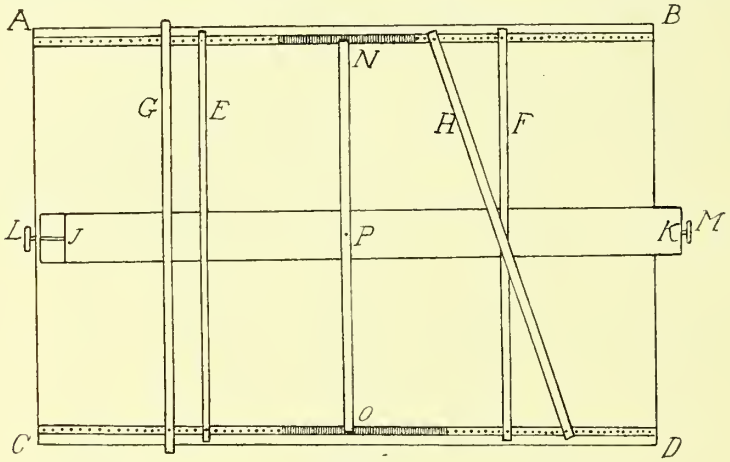


Fig. 15.
Nach Heymans([118]), S. 130).

angebracht worden sind. Über diese Metallstifte lassen sich lose Kupferstreifen E, F, G, H von 1 em Breite in beliebiger Lage und Entfernung aufhängen. Auf halber Höhe hat das Brett eine Rinne mit trapezförmigem Durchsehnitt, in welehe ein beweglicher Holzstab I K genau paßt. Mittels der Schraube L läßt sich dieser Holzstab in der Rinne langsam hin- und herschieben; mittels einer zweiten Schraube M kann ein an dem Holzstab befestigter Metallreifen N O um eine Achse P um etwa 10° nach beiden Seiten gedreht werden. Der ganze Apparat ist schwarz angestrichen, der Reifen N O grau . . . .“ Bei den Versuehen wird der Apparat in etwa 2½ m Entfernung vor der sitzenden Versuehsperson auf eine Staffelei gestellt. „Zunächst stellt man nun den Reifen N O durch Drehung der Schrauben so ein, daß er an beiden Enden genau den Nullpunkt der Einteilung anzeigt. Sodann werden zu beiden Seiten desselben, in gleicher und innerhalb einer Versuchsgruppe konstant bleibender Entfernung, zwei weitere Reifen E, F vertikal aufgehängt; diese bilden mit jenem die Hauptlinien und sind, um einer Verwechselung mit den gleich zu erwähnenden Nebenlinien vorzubeugen, ebenso

*) Der Versuch gelingt auch, wenn man statt der Streifen kreisrunde Scheiben etwa Münzen, verwendet.

wie der mittlere Reifen, grau angestrichen." Als Nebenlinien werden jedesmal zwei weiße Streifen verwendet, welche entweder schräg oder parallel zu den Hauptlinien aufgehängt werden. Werden sie parallel zu und etwa nach links von den äußeren Hauptlinien aufgehängt (so wie es G in der Figur für einen andeutet), so müssen diese infolge der Loebschen Täuschung nach rechts verschoben erscheinen. Die Abstände der seitlichen Hauptlinien von der mittleren erscheinen nicht mehr gleich; N O muß, um die scheinbare Gleichheit der Abstände wiederherzustellen, mittels der Schraube L um einen an der Teilung ablesbaren Betrag nach rechts verschoben werden. Werden dagegen die beiden weißen Streifen schräg aufgehängt, so daß sie die beiden äußeren Hauptlinien in der Mitte schneiden (so wie H), so erleiden diese eine Richtungsänderung im Sinne der Zöllnerschen Täuschung: ihr Parallelismus mit der mittleren Hauptlinie erscheint aufgehoben und diese muß mittels der Schraube M um einen meßbaren Betrag gedreht werden, wenn der Parallelismus scheinbar wiederhergestellt werden soll. Genaue Messungen mit diesem Apparat lassen sich aber nur an geübten Versuchspersonen anstellen.

Zahlreiche andere „Täuschungsfiguren", z. T. Modifikationen der früher angeführten, finden sich bei Botti[111]; Einthoven[116]; Kiesow[123]; Laska[125]; Lipps[127]; Oppel[132, 133]; Pearce[134]; Sehumann[138]; Thiéry[139]; Wundt[7 und 142]). Von den aufgezählten „Täuschungen" anscheinend prinzipiell verschieden ist die von Hofmann und Bielschowsky([321], S. 32; [120]) beobachtete Änderung der Einstellung der scheinbaren Horizontalen und Vertikalen während und unmittelbar nach Betrachtung schräger Konturen (Druckschrift oder parallele gerade Linien). Zu ihrem Zustandekommen ist vollkommener Ausschluß aller sonstigen Konturen im Gesichtsfelde erforderlich, welche irgend einen Aufschluß über die vertikale Richtung liefern können. Den Betrag der Ablenkung maßen H. und B. in der Weise, daß mittels eines über Rollen geführten Schnurlaufs vom Beobachter aus ein drehbarer Faden vor dem mit schrägen Konturen ausgefüllten Hintergrunde in die scheinbar vertikale bezw. horizontale Richtung eingestellt wurde. Ablesung des Neigungswinkels der Konturen und der Einstellung des Fadens an zwei Gradbogen auf der Rückseite des Apparates.

Auf eine Verschiedenheit der Längenschätzung bei ein- und zweiäugigem Sehen haben Tschermak und Hoefer[119] aufmerksam gemacht. Hoefer fixierte mit beiden Augen ein median vor ihm befindliches Lot 1 (ein durch Gewicht gespanntes Haar) und brachte in die Verlängerung der Gesichtslinie des linken Auges ein anderes Lot 2 an, welches demnach für das linke Auge vollständig vom Lot 1 verdeckt wurde und bloß dem rechten Auge sichtbar war. Wurde nun das linke Auge abwechselnd verdeckt und wieder freigegeben, so erschien der Seitenabstand des Lotes 2 von 1 bei binokularem Sehen erheblich kleiner als bei Betrachtung mit einem Auge. Zur Charakterisierung des Schätzungsunterschieds wurde im Längshoropter neben Lot 1 ein drittes Lot 3 aufgehängt, und bei einäugiger bezw. binokularer Beobachtung so lange seitlich verschoben, bis der Seitenabstand von Lot 3 und 1 jeweils gleich groß erschien wie der von Lot 2 und 1.

III. Untersuchung der Korrespondenz beider Netzhäute.

A. Normale Korrespondenz.

Zur genauen Bestimmung des gegenseitigen Lageverhältnisses der korrespondierenden Stellen beider Netzhäute dient eine Methode, welche

von Hering als Methode der gegenseitigen Substitution der Netzhautstellen oder kurz als Substitutionsmethode bezeichnet wird. Zur Untersuchung benutzt man eine „haploskopische Anordnung", d. h. es wird jedem Auge ein besonderes Gesichtsfeld dargeboten. Der verschiedene Inhalt beider Gesichtsfelder erscheint im gemeinsamen subjektiven Sehfelde vereinigt und man stellt dann fest, aus welchen monokular gesehenen Teilstücken z. B. eine gerade Linie zusammengesetzt werden kann, usf.

Da dieselbe Substitutionsmethode auch zur genauen Untersuchung des Listingschen Gesetzes der Augenbewegung verwendet wird, so sind die für die Untersuchung der Netzhautkorrespondenz verwendeten Anordnungen im wesentlichen identisch mit den unten S. 195 zu erwähnenden. Zum Teil handelt es sich hier ja ebenfalls um die genaue Untersuchung der Orientierung der Netzhaut bei einer bestimmten Richtung der Gesichtslinien, als welche man am besten die Primärstellung derselben benutzt. Hier wie dort bringt man in der Frontalebene, welche durch den Fernpunkt der myopischen oder durch Vorsetzen von Konkavgläsern myopisch gemachten Augen (im letzteren Falle muß eine Schiefstellung der Konkavlinsen sorgfältig vermieden werden) einen vertikalen, mit weißem (oder grauem) Papier überzogenen Schirm auf, auf welchem gerade vor jedem Auge ein Fixationspunkt derart angebracht ist, daß bei parallel geradaus gerichteten Gesichtslinien die Gesichtslinie jedes Auges den Schirm im Fixationspunkte senkrecht trifft (Hering, R., S. 356).

Daß dies wirklich der Fall ist, kontrolliert man nach Hering(3), S. 173) in der Weise, daß man in den Schirm von hinten her durch Klebwachs hindurch eine feine lange ganz gerade Nadel einsticht, sie mittels eines Winkels genau senkrecht zur vorderen Ebene des Schirmes einstellt, und das eine Auge (während das andere geschlossen ist) in eine solche Lage bringt, daß ihm die Nadel in totaler Verkürzung erscheint. Eine zweite Nadel für das andere Auge wird in ebensolcher Weise, in horizontaler Richtung um den gegenseitigen Abstand der mittleren Knotenpunkte der beiden Augen von der anderen entfernt, in den Schirm eingestoßen. „Kennt man diesen Abstand nicht, oder will man den Apparat zugleich für andere Augen brauchbar machen, die einen etwas anderen Abstand voneinander haben, so macht man nach ungefährer Schätzung des Abstandes einen kurzen horizontalen Spalt für die zweite Nadel, stellt das Auge derjenigen Seite, auf welcher die erste Nadel befestigt ist, der letzteren so gegenüber, daß man sie bei Schluß des anderen Auges in totaler Verkürzung, d. h. ihre Spitze als Zentrum eines kleinen Hofes sieht, und schiebt dann, ohne den Kopf zu verrücken, die zweite bereits senkrecht gestellte Nadel versuchsweise im Spalt hin und her, bis sie dem nun geöffneten Auge ihrer Seite bei Schluß des ersten Auges ebenfalls in totaler Verkürzung erscheint. Dann befestigt man auch die zweite Nadel mit Wachs."

Um die Heringsche Anordnung als ständige Laboratoriumseinrichtung für verschiedene Personen stets bereit zu haben, habe ich in einem Reißbrett rechts neben der Mitte ein kreisrundes Loch bohren und auf der Rückseite eine Metallhülse befestigen lassen. Durch die Hülse als Führung steckt man einen bis zur Vorderfläche des Reißbretts reichenden Metallzylinder durch, der in der Mitte seiner ebenen Vorderfläche eine genau senkrecht zu dieser Ebene justierte Nadel mit angelaufener Spitze trägt. Links neben der Mitte des Reißbretts befindet sich ein horizontaler Spalt, hinter welchem längs einer Skala eine zweite Metallhülse samt Metallzylinder mit Nadel in horizontaler Richtung verschieblich ist. Die Einstellung des rechten Auges gerade gegenüber der fixen und die Einstellung der zweiten verschieblichen Nadel gegenüber dem am linken Auge erfolgt in der oben beschriebenen Weise, nachdem man ein weißes Papierscheibchen als Unterlage auf die Vorderfläche der Metallzylinder befestigt hat. Darauf werden die Metallzylinder mit den Nadeln entfernt, die Vorderfläche des Reißbrettes glatt mit Papier überspannt, und um beide Fixationspunkte herum ein kreisrundes Stück Papier vom Durchmesser der Metallzylinder (natürlich von hinten her) glatt ausgestanzt. Nun-

mehr kann man an Metallzylindern, welche durch die Führung hindurch gesteckt werden, die im folgenden beschriebenen Einrichtungen, Stäbe, Fäden etc. anbringen. Ich werde mich im folgenden noch einige Male auf diese Anordnung beziehen.

Um beide Fixationspunkte herum zeichnet man nun je einen kleinen Kreis und setzt vor jedes Auge eine innen geschwärzte zylindrische Röhre, so daß jedem Auge allein der vor ihm befindliche Fixationspunkt samt seiner Umgebung sichtbar bleibt. Von den Fixationspunkten f und f′ läßt man nun nach dem Muster der Figur 16 in horizontaler und vertikaler Richtung Fäden auslaufen, welche in der Peripherie an Gradteilungen verschieblich sind. Blickt jedes Auge

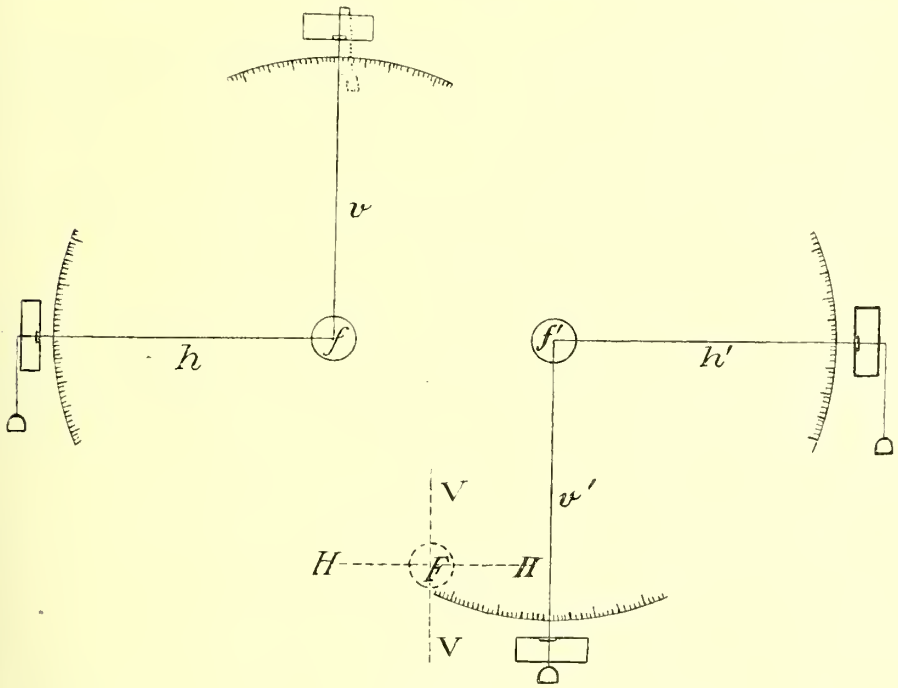


Fig. 16.
Vergl. Hering(312), S. 91).

auf seinen Fixationspunkt, so vereinigen sich beide im binokularen Sammelbilde und man erblickt dann den Punkt F als Mittelpunkt eines Kreuzes (vergl. die gestrichelten Linien V und H in Figur 16). Der Beobachter hat nun die Aufgabe, die vertikalen und horizontalen „Halblinien“ v und v′, bezw. h und h′ so einzustellen, daß die eine immer die scheinbare Verlängerung der anderen bildet. Achtet er auch noch darauf, daß die Richtung von v v′ und h h′ die scheinbare Vertikale und Horizontale angibt, so hat er dabei auch die oben S. 121 gestellte Aufgabe erfüllt.

In meiner Einrichtung (vergl. Fig. 16) wird der kleine Kreis um den Fixationspunkt durch den Rand des ausgestanzten Papierkreises, der wieder aufgesetzt wird, erzeugt. In den Führungszylinder kommt ein mit einer Nadelöse versehener Zylinder. Durch die Öse wird ein Faden hindurchgesteckt, dessen eine Hälfte horizontal, die andere

vertikal ausgespannt wird. Die Enden der Fäden gehen rechts und links, oben und unten nach Recklinghausen, Hering und Volkmann (vergl. Hering[312]), S. 91) durch Schieber und werden mit Gewichten gespannt erhalten. Will man bloß je eine vertikale oder je eine horizontale Halblinie verwenden, so benutzt man Metallzylinder mit einer zentralen Bohrung, durch welche der Faden hindurchgesteckt wird.

Volkmann[6]), II. S. 220) brachte die Halblinien als Radien kreisförmiger Scheiben an, welche entlang einer Gradteilung drehbar waren.

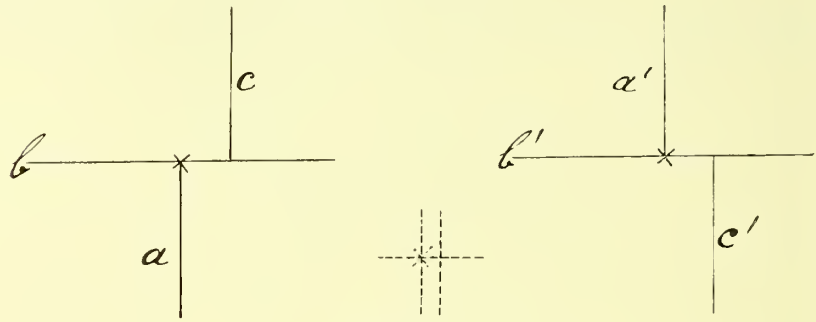


Fig. 17.
Nach Hering (R. S. 361).

Zur Ermittelung der zu den mittleren Quer- und Längsschnitten beider Netzhäute parallelen korrespondierenden Nebenquer- und Längsschnitte dienen die von Hering (siehe R. S. 361 ff.) modifizierten Anordnungen Volkmanns[6]), S. 230), welche in den Skizzen 17 und 18 wiedergegeben

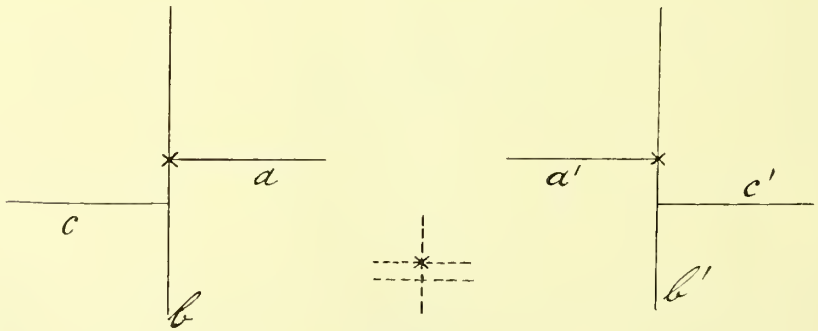


Fig. 18.
Nach Hering (R. S. 362).

sind. Die ausgezogenen Linien sind die haploskopischen Halbfiguren, die gestrichelten Linien versinnlichen das Sammelbild, die Fixationspunkte sind mit einem Kreuz bezeichnet. Die haploskopisch zu vereinigenden Halbfiguren bestehen aus je einer vom Fixationspunkte ausgehenden Halblinie a, a', welche sich im binokularen Sammelbilde mit den beiderseits identischen, durch den Fixationspunkt durchlaufenden senkrecht zu ihnen stehenden Linien

b, b′*) zu einem Kreuze vereinigen. Die eine der beiden seitlichen Halblinien**) c und c′ ist fest, die andere machte Volkmann(6), II. S. 231) parallel mit sich selbst verschieblich und ließ sie vom Beobachter so einstellen, daß sie im Sammelbilde die scheinbare Fortsetzung der anderen bildete. Für sehr exzentrisch liegende Netzhautstellen muß man statt feinerer Linien breitere Streifen verwenden und man bedient sich dabei zweckmäßig des Wheatstoneschen Spiegelstereoskops (Schöler[157]), S. 5), oder wenigstens eines unter 45° vor ein Auge gestellten Spiegels (Mandelstamm, vergl. die Anordnung bei Hering, R. S. 367).

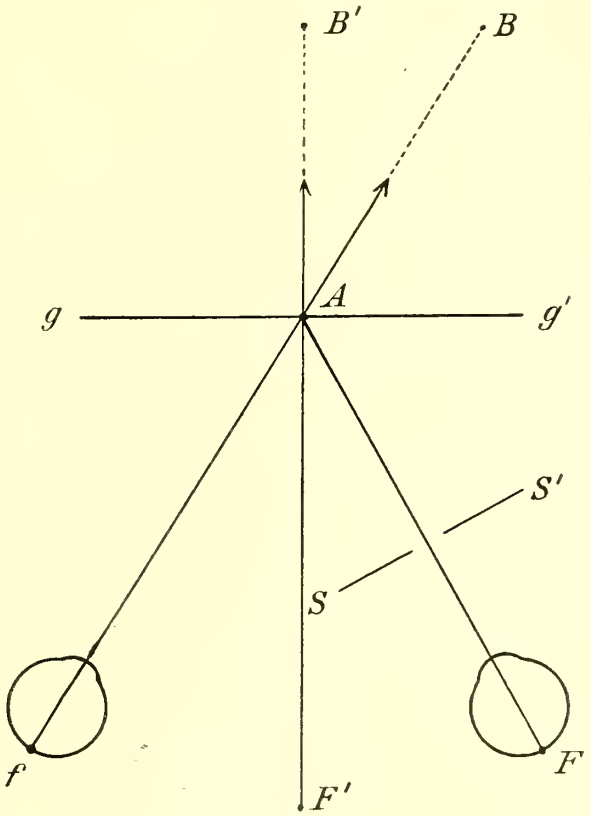


Fig. 19.

B. Das Gesetz der identischen Sehrichtungen.)**

Zum Beweise dieses sehr wichtigen von Hering formulierten Gesetzes (vergl. Hering, R. S. 386 ff.; Helmholtz O. S. 756 ff.), dessen Verständnis für das Eindringen in die Lehre vom Binokularsehen unbedingt erforderlich ist, dienen die von Hering (l. c.) angegebenen Versuche. Dem Anfänger, der im Beobachten noch wenig Übung hat, ist am meisten folgender Versuch zu empfehlen: Man mache auf eine Fensterscheibe (g g′ der Figur 19) in Augenhöhe einen Tintenpunkt A, und stelle sich so hin, daß die Augen etwa 20 cm von der Scheibe entfernt sind,

*) Für Personen mit physiologischer Netzhautinkongruenz, bei denen also die mittleren Längssehnitte nicht senkrecht auf den Quersehnitten stehen, müssen die beiden Halblinien a und a′ um den Betrag der Netzhautinkongruenz und in ihrem Sinne von der senkrechten Richtung abweichen.

**) Mandelstamm[155]) stellte diese Striche durch lange gerade Nadeln dar.

***) Bezüglich der Untersuchung der Frage, ob die Eindrücke des rechten und linken Auges voneinander unterschieden werden können, muß auf die Literatur verwiesen werden: v. Fleischl[151]), Schön[158, 159]), Bourdon[146, 147, und 2]), p. 225 ff.), Heine[153, 154a und b]), v. Brücke und Brückner[148, 149, 150]). Bezüglich der technisch ungemein einfachen Versuche, welche zur Entscheidung der Frage angestellt worden sind, ob man mit korrespondierenden Netzhautstellen doppelt sehen kann, vergl. Hering (R. S. 434 ff.).

und daß, wenn man den Punkt A mit symmetrisch konvergenten Gesichtslinien fixiert, in der Gesichtslinie des einen z. B. des linken Auges ein weit entfernter, gut von der Umgebung abstechender Gegenstand B (ein Schornstein oder etwas Ähnliches) sich befindet, was man ja durch Verdecken des rechten Auges leicht kontrollieren kann. Den Kopf stützt man dabei am besten an einen einfachen Stirnhalter. Dann hält man vor das rechte Auge in ca. 10 cm Entfernung einen Schirm S S′ mit einer kleinen Öffnung (z. B. eine Visitenkarte, in die man ein Loch von etwa 2 mm Durchmesser gemacht hat) derart, daß dieses Auge nur noch den Punkt A sieht, der nach wie vor binokular fixiert wird, während die weitere Umgebung abgedeckt ist. Der Gegenstand B erscheint nun nicht etwa so, wie er wirklich liegt, nach rechts von A, sondern geradeaus vor dem Beobachter in der Richtung F′ B′ hinter A, also nach dem Heringschen Schema in der Hauptsehrichtung, welche bei symmetrischer Konvergenz der Gesichtslinien im allgemeinen in der Medianebene geradeaus nach vorne gerichtet ist. Wer im Beobachten von Doppelbildern geübt ist, kann den Schirm weglassen und sich davon überzeugen, daß in der Hauptsehrichtung alle Gegenstände erscheinen, welche sich auf einer der beiden Foveae abbilden, demnach alle Objekte, welche auf einer der beiden Gesichtslinien (f A bezw. F A und deren Verlängerung) liegen. Objekte, welche auf den Richtungslinien zweier korrespondierender exzentrischer Netzhautstellen liegen, erscheinen ebenfalls in einer gemeinsamen Sehrichtung, welche mit der Hauptsehrichtung einen Winkel bildet.

Zur Demonstration für ganz Ungeübte empfiehlt sich ferner eine der beiden folgenden Anordnungen, die mir von Herrn Kollegen F. Hillebrand mitgeteilt wurden, und bei welcher die den Anfänger störenden seitlichen Doppelbilder ganz abgeblendet werden.

1. „Der Beobachter sitzt mit fixiertem Kopfe (Stirnhalter und Kinnstütze genügen) an einem Tisch. In einer Entfernung, die so groß gewählt wird, als es das Zimmer zuläßt, steht vor ihm ein möglichst großer, vertikaler, gut beleuchteter weißer Schirm, bezw. die gleichmäßig getünchte helle Wand. Ein rotes und ein grünes Seidenband werden mit ihrem einen Ende an der oberen Kante des Schirms befestigt, am anderen mit einem kleinen Gewicht belastet, so daß sie vertikal herabhängen und dem Schirm anliegen. Um sie bequem verschiebbar zu machen, kann man sie auch am oberen Ende belasten und dieses hinter dem Schirm herabhängen lassen. Die Bänder hängen symmetrisch zur Medianebene des Beobachters. Auf dem Tische ist an einem seitlich stehenden Stative nahe dem Beobachter ein dünnes Stäbchen (Stahldraht) so angebracht, daß es horizontal, frontalparallel und in Augenhöhe liegt. Das Stäbchen trägt in seiner Mitte eine schwarze Scheibe von 1 bis 2 cm Durchmesser und wird so gestellt, daß die Scheibe in der Medianebene liegt. Zwischen dem Beobachter und der Scheibe steht ein schwarzer Schirm mit rechteckigem Fenster. Lage und Höhe des letzteren werden so gewählt, daß sie dem Beobachter die obere und untere Kante des fernen weißen Schirms eben noch verdecken. Die beiden Bänder werden so aufgehängt, daß, wenn der Beobachter das Scheibchen fixiert, das grüne Band von der Gesichtslinie des einen Auges, das rote von der des andern getroffen wird. Dieser Stellung muß die Breite des erwähnten Fensters so angepaßt werden, daß erstens die indirekt gesehenen Halbbilder der beiden Bänder außerhalb des Fensters liegen, also abgeblendet sind, und zweitens nur der weiße Schirm, dieser aber in möglichster Ausdehnung gesehen wird; das Stativ, welches das Querstäbchen trägt, wird ebenfalls durch den Schirm verdeckt. Fixiert nun der Beobachter die schwarze Scheibe (besser das durch ein weißes Korn markierte Zentrum derselben), so sieht er folgendes: ein helles Rechteck, in der Mitte desselben eine schwarze Scheibe und durch diese durchlaufend das horizontale Stäbchen und einen vertikalen Streifen, der im Wettstreit bald rot, bald grün erscheint, bezw., da der Wettstreit sich nicht überall in der gleichen Phase befindet, fleckig aussieht. Prinzipiell ist die Wahl der Distanzen gleichgültig; man tut aber gut, die schwarze

Scheibe nicht so nahe zu bringen, daß die Bänder allzu verwaschen erscheinen. Bei einer Entfernung des weißen Schirmes von 7 m stelle ich die schwarze Scheibe in etwa 75 cm, den Schirm mit dem Fenster in etwa 45 cm Entfernung vom Beobachter. Wegen der variablen Augendistanz muß man entweder den gegenseitigen Abstand der beiden Bänder variieren oder, was weniger umständlich ist, die Entfernung der schwarzen Scheibe vom Beobachter. Letzterenfalls befestigt man auf dem Tisch medianparallel ein Lineal so, daß es für den Sockel des Statives eine Führung abgibt und die Verstellung der Scheibe daher immer in der Medianebene erfolgt.

II. An dem fernen weißen Schirm wird in der Medianebene ein vertikales schwarzes Band so angebracht wie vorhin die farbigen Bänder. In der Nähe des Beobachters werden in Augenhöhe zwei Scheibchen, ein grünes und ein rotes von 1 cm Durchmesser so aufgestellt, daß, wenn der Beobachter mit horizontaler Blickebene auf das schwarze Band konvergiert, das Zentrum des grünen Scheibchens in der Gesichtslinie des einen Auges, das des roten in der Gesichtslinie des andern liegt. Zwischen dem Beobachter und den beiden Scheibchen stellt man einen vertikalen schwarzen Kartonstreifen frontalparallel so auf, daß er durch die Medianebene halbiert wird. Dieser Kartonstreifen hat den Zweck, die peripher gelegenen Halbbilder der beiden farbigen Scheiben abzublenden, und muß, damit dies erreicht werde und dabei dennoch ein möglichst großes Stück des weißen Schirmes unverdeckt bleibe, eine solche Breite, bezw. Entfernung vom Beobachter haben, daß er mit seiner rechten Kante gerade noch das dem rechten Auge angehörige Halbbild des linken Scheibchens, mit seiner linken gerade noch das dem linken Auge angehörige Halbbild des rechten Scheibchens deckt. Fixiert der Beobachter eine in Augenhöhe gelegene Stelle des schwarzen Bandes, so sieht er ein Stück des fernen weißen Schirmes, das von den symmetrischen Doppelbildern des schwarzen Kartonstreifens links und rechts begrenzt wird. Mitten durch dieses weiße Feld läuft ein vertikaler schwarzer Streifen und auf diesem Streifen liegt in Augenhöhe ein Scheibchen, dessen Farbe zwischen Grün und Rot wechselt, gelegentlich fast farblos erscheint. Hat man die Scheibchen auf dünnen vertikalen Stäben aus geschwärztem Stahldraht angebracht, so verschmelzen natürlich auch diese und decken dann den unteren Teil des fernen Bandes. Der gegenseitige Abstand der beiden Scheiben muß der Augendistanz des jeweiligen Beobachters angepaßt werden. Für den Laien ist diese Anordnung darum besonders frappant, weil er trotz der median gelegenen Blende Band und Scheibchen in der Medianebene sieht. In meiner Anordnung waren die Scheibchen zirka 70 cm, der Kartonstreifen 22 cm vom Beobachter entfernt; die Breite des Streifens betrug 4 cm, der Abstand der beiden Scheibchen voneinander 6 cm."

C. Anomale Netzhautbeziehung.

Bei Schielenden kann sich eine Art anomaler Beziehung beider Netzhäute zueinander ausbilden, die sich durch gewisse wichtige Merkmale — ihr Schwanken, dauernde Ungleichwertigkeit beider Netzhauteindrücke — von der normalen stabilen Korrespondenz unterscheidet und infolge dieser Anomalien auch eine gewisse Verschiedenheit der Untersuchungsmethoden erfordert. (Siehe Tschermak[162]), dessen Darstellung im folgenden wesentlich benutzt wird; die Literatur bis 1901 ist kritisch zusammengefaßt bei F. B. Hofmann[154]); man vergl. ferner Bielschowsky[145]) und Schlodtmann[156]).)

Ob zunächst überhaupt eine anomale Netzhautbeziehung besteht, läßt sich dadurch feststellen, daß man: 1. in der Gesichtslinie jedes Auges ein deutlich von der Umgebung abstechendes Objekt bringt. Erscheinen diese Objekte, die sich in beiden Augen auf der Fovea abbilden, an verschiedenen Orten, so ist die normale Korrespondenz gestört. Genaueres darüber bei Tschermak[160]).

2. Weitaus die bequemste Untersuchungsmethode besteht in der Verwendung intensiver Nachbilder (Blendungsbilder). Man verdeckt zunächst dem Patienten ein Auge, und erzeugt im anderen das intensive Nachbild

einer Glühlampe mit vertikal gestelltem geradem Kohlenfaden (von Siemens u. Halske), an welcher durch Verdeckung ihrer Mitte ein Fixationspunkt markiert ist. Dann stellt man den Kohlenfaden horizontal, und läßt unter Verdeckung des ersten Auges die mittlere Marke einige Zeit hindurch mit dem anderen Auge fixieren. Blickt dann der Patient auf eine gleichmäßige Fläche, so sieht er bei normaler Korrespondenz im Nachbilde ein rechtwinkliges symmetrisches Kreuz, bei anomaler Netzhautbeziehung erscheint dagegen der eine Arm des Kreuzes gegen den anderen verschoben bezw. verdreht.

Ist eine anomale Netzhautbeziehung nachgewiesen, so ist die Hauptfrage der weiteren Untersuchung die, ob zwischen der Größe des Schielwinkels und der Anomalie der Netzhautbeziehung eine Übereinstimmung besteht, in der Weise, daß jene exzentrische Stelle des Schielauges, auf welcher sich dasselbe Objekt abbildet, wie auf der Fovea des fixierenden (führenden) Auges, mit der letzteren eine gemeinschaftliche Sehrichtung besitzt.

Man entgeht vielen Schwierigkeiten, und es ist auch wohl allein korrekt, wenn man nicht von einer „Anomalie der Sehrichtungen", sondern von einer „Anomalie der Netzhautbeziehung" spricht*). Definiert man diese durch den Winkel, welchen die Richtungslinie der mit der Fovea des Schielauges sehrichtungsgleichen exzentrischen Netzhautstelle im führenden Auge mit der Gesichtslinie des letzteren Auges bildet, so kann man die Größe des Anomaliewinkels direkt messen und mit dem Schielwinkel vergleichen.

Die oben gestellte Aufgabe zerfällt in zwei Teile:

a) die Bestimmung des Schielwinkels und

b) den Vergleich der Größe der Netzhautanomalie mit der Größe des Schielwinkels.

Zur Messung des Schielwinkels eignet sich am besten die subjektive Methode mittels Nachbildes. Der Pat. erzeugt durch Fixation einer Flamme oder dergl. auf der Fovea des Schielauges, während das andere „führende" Auge verdeckt ist, ein möglichst dauerhaftes Nachbild. Dann läßt man ihn bei fixiertem Kopf mit dem anderen („führenden") Auge einen gerade vor diesem befindlichen Punkt auf einer vertikalen gleichmäßigen Fläche (helle Wand) fixieren, und beide Augen offen halten. Dabei ist natürlich die Gesichtslinie des Schielauges nicht auf den Fixationspunkt (A in Figur 20) des führenden Auges, sondern auf einen anderen Punkt a hin gerichtet. Diesen Punkt findet man, wenn der Untersuchte bei offenen Augen eine Bleistiftspitze oder ein ähnliches „Testobjekt" mit dem Nachbilde im Schiel-

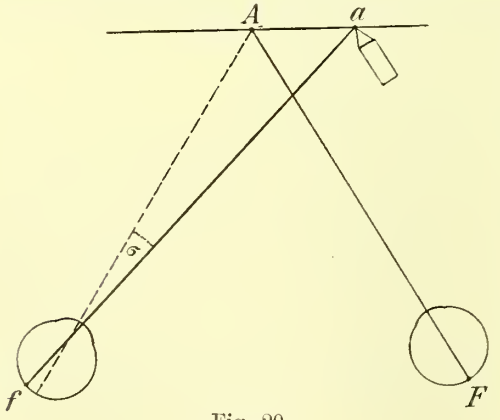


Fig. 20.

*) Ich korrigiere damit auch meine eigene Ausdrucksweise in der Abhandlung 154 des Literaturverzeichnisses.

auge zur Deckung bringt. Die Bleistiftspitze gibt dann die Stelle an, welche sich im Schielauge auf der Fovea abbildet, also die Schnittstelle der Gesichtslinie des Schielauges mit der ebenen Wand. Natürlich muß man sich durch zeitweises Verdecken des Schielauges davon überzeugen, daß der Untersuchte tatsächlich das Bild der Spitze im Schielauge und nicht etwa das exzentrische Bild derselben im führenden Auge beachtet.

Hat man auf diese Weise den Schnittpunkt der Gesichtslinie des Schielauges mit der ebenen Wand in a bestimmt und markiert, so bringt man neben der Marke a zwei gut abstechende farbige Scheibchen an, verschließt oder verdeckt das Schielauge und erzeugt im führenden Auge, das weiterhin ruhig den Punkt A fixiert, zwei Nachbilder der Scheibchen, deren Netzhautbilder neben der exzentrischen Netzhautstelle e in Figur 21 liegen. Sodann öffnet man das Schielauge und überzeugt sich, ob die Nachbilder der beiden Scheibchen im führenden Auge die Marke a, welche sich auf der Fovea f des Schielauges abbildet, einschließen oder nicht. Ist das erstere der Fall, dann besitzt die Stelle e des führenden Auges dieselbe Sehrichtung wie die Fovea des Schielauges und die Schielablenkung wird durch die Netzhautanomalie gerade ausgeglichen. Die angeführte Methode ist die richtigste, aber auch die schwierigste. Eine andere siehe bei Tschermak[162]).

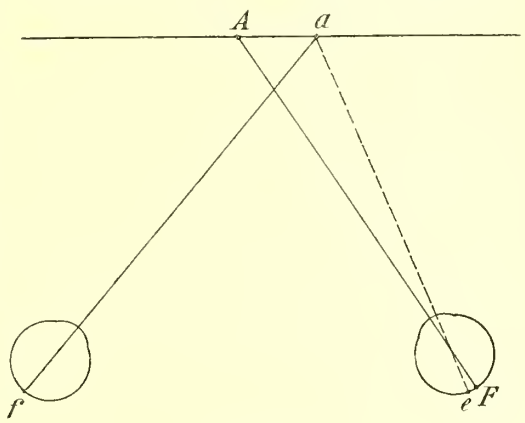


Fig. 21.

Sehr viel einfacher kann man die exzentrische Netzhautstelle des führenden Auges, welche mit der Fovea des Schielauges die gleiche Sehrichtung besitzt, auf folgende Weise bestimmen. Man läßt den Pat. zunächst im Schielauge ein intensives Nachbild auf der Fovea erzeugen, dann läßt man ihn mit dem anderen (führenden) Auge einen Punkt auf einer vertikalen hellen Wand fixieren (wie oben), verdeckt das Schielauge und führt eine bloß im fixierenden Auge abgebildete Bleistiftspitze an den Ort des Nachbildes hin. So erhält man den Betrag der Netzhautanomalie und kann ihn nun mit dem nach der subjektiven Methode gemessenen Schielwinkel vergleichen. Der Vergleich ist aber deswegen nicht zuverlässig, weil sich durch das Verdecken eines Auges die Schielstellung und die Lokalisationsweise ändern können (Schlodtmann[156]). Man kann also diese Methode bloß zur ersten Orientierung verwenden.

Um schließlich die gesamte Leistungsfähigkeit der anomalen Netzhautbeziehung festzustellen, muß man noch untersuchen, ob sich auf ihrer Grundlage durch entsprechende Verlagerung stereoskopischer Halbbilder binokulares Einfachsehen und Fusionszwang bezw. binokulare Tiefenwahrnehmung erzielen läßt. Da es sich aber bei diesen Anomalien nur ganz ausnahmsweise bloß um eine Verschiebung in der horizontalen Richtung handelt, vielmehr gewöhnlich auch eine Höhenverschiebung und Rollung damit verbunden ist, so muß man dementsprechend auch die Halbbilder nicht bloß in der horizontalen, sondern auch in der vertikalen verschieben und sie gegeneinander ver-

drehen. Gaudenzi[152]) hat für solche und ähnliche Versuche ein eigenes „haploskopisches Doppelperimeter“ angegeben.

IV. Untersuchung der optischen Lokalisation nach der Tiefe.

A. Motive der Tiefenauslegung, die schon beim Sehen mit einem Auge in Wirksamkeit treten.

Als solche sind nach Helmholtz (O. S. 767 ff.) und Hering (R. S. 577 ff.) zu bezeichnen:

1. Die Linearperspektive.
2. Die Art der Verteilung von Licht und Schatten.
3. Die Luftperspektive.
4. Die Größe bekannter Gegenstände.
5. Die partielle Deckung der Objekte.
6. Die parallaktische Verschiebung der Objekte bei Bewegungen unseres Kopfes.

Die angeführten Motive, durch die wir beim einäugigen Sehen bei der Beurteilung des Abstandes der Objekte geleitet werden, sind sämtlich der Erfahrung entnommen, und sie können daher unter Verhältnissen, welche von den gewohnten abweichen, wenn die binokulare Tiefenwahrnehmung ausgeschaltet ist, zu falscher Lokalisation der Gesichtseindrücke führen. Daraus resultieren dann „optische Täuschungen“, von denen als wichtigste anzuführen sind:

Ad 1. Die Tiefenauslegung perspektivischer ebener Zeichnungen (am besten auf Glas) eines Würfels, eines Kreuzes mit einem vertikalen und einem schrägen Arm, bei Betrachtung mit einem Auge. Besonders schön gelingt die Täuschung, wenn man eine ebene Figur des Kreuzes oder des Würfels aus Draht herstellt (Hering l. c.). Bei längerer Betrachtung derartiger Figuren erfolgt leicht eine Inversion, beim Drehen eine scheinbare Umkehrung der Drehungsrichtung (zuerst Sinstedcn[242]) an Windmühlenflügeln, die so weit entfernt sind, daß binokulare Tiefenwahrnehmung nicht mehr möglich ist). Über die Bedingungen für das Auftreten der Inversion vergl. Mach[217]), S. 405 ff., Hoppe[202]), J. Loeb[216]), Wallin[249]), A. Vicholkovska[247]), Reuss[228]), Burmester[173a und b]).

Ad 2. Die Umwandlung einer Matrize in eine Patrize erfolgt unter gewissen Umständen (bei längerer Betrachtung) ganz von selbst (vergl. Hering R. S. 581). Sehr eindringlich wird sie, wenn man den Beobachter über die Richtung, von der die Beleuchtung kommt, täuscht (Oppel[223])). Man lege ein Hohlrelief, einen Gipsabdruck der Hand oder Ähnliches, vor ein helles Fenster, schatte das direkte Licht durch einen Schirm ab und beleuchte mittels Spiegels von der Zimmerseite her. Beobachtet man mit einem Auge, so erscheinen die vertieften Stellen erhaben. Oppel verwendete künstliche seitliche Beleuchtung, die durch einen um das Relief gelegten Spiegelrahmen reflektiert wurde (Anaglyptoskop). Einen anderen Apparat gab Moussard[221]) an. Eine ausführliche Analyse mit Literaturdaten gab neuerdings Burmester[173]).

Ein weiterer Fall von monokularer Tiefenauslegung auf Grund eines (scheinbaren) Schattens ist folgender: Legt man breite rote Papierringe auf

blaues Papier, so sieht man sie, wenn man ein kleines Loch exzentrisch vor die Pupille hält, als erhabene Wülste oder vertiefte Gruben, je nachdem die Öffnung vor dem rechten oder linken Auge, temporal oder nasal liegt (Einthoven[179]). Hier auch die Erklärung).

Ad 4. Einen sehr schlagenden Versuch über das scheinbare in die Ferne Rücken von Gegenständen, die bloß verkleinert werden, hat Hillebrand angegeben. In dem S. 148 ff. beschriebenen Apparate wurde bei parallel gestellten Schienen m und m′ ein Rahmen mit Karton quer über die Schienen so gestellt, daß er von beiden Schlitten getragen und durch die Symmetrieebene des Apparates halbiert wurde. Der Karton verdeckte somit die Aussicht auf die Milchglastafel des Apparates. In der Mittellinie des Kartons war in Augenhöhe ein Aubertsches Diaphragma angebracht. Bei einer gewissen Öffnung desselben sieht der Beobachter ein quadratisches weißes Feld, ein Stück der dahinter stehenden Milchglasplatte, weiß aber nicht, daß er es mit einer Öffnung zu tun hat, die der Untersucher durch gleichzeitige Bewegung aller Seiten vergrößern und verkleinern kann. Läßt man nun den Kartonschirm fest stehen und verkleinert bezw. vergrößert die Öffnung des Diaphragmas, so erhält der Beobachter den deutlichen Eindruck der Entfernung, bezw. Annäherung.

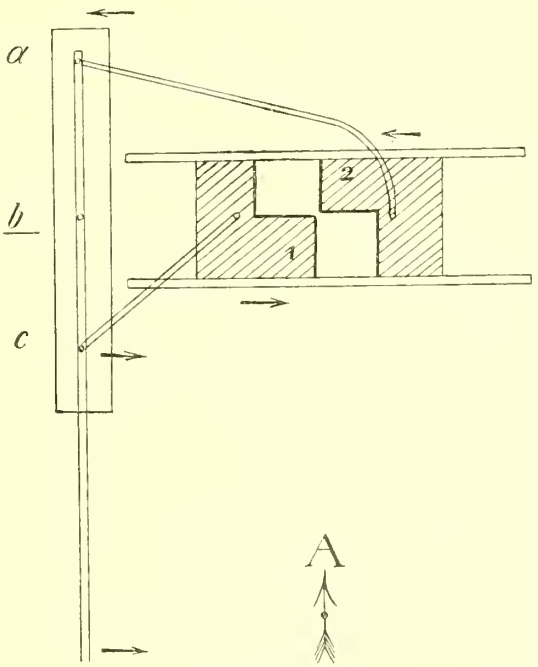


Fig. 22.
Nach Heine([193]), S. 486).

Ad 6. Straub[244]) hat gezeigt, das man auch durch Erzeugung einer scheinbaren parallaktischen Verschiebung im Stroboskop einen monokularen Tiefeneffekt erzielen kann*). Ein ähnliches Resultat — Scheinbewegung mit Tiefeneffekt — hat jüngst Krusius[214]) erhalten, als er einem Auge zwei stereoskopische Halbbilder mit einer bestimmten Frequenz abwechselnd nacheinander sichtbar machte. (Ähnliche Versuche zuerst bei Heine[188]), S. 166.) Wird die nach der Kopfbewegung zu erwartende Scheinbewegung durch eine entgegengesetzte Bewegung der mit einem Auge beobachteten Objekte überkompensiert, so tritt eine den wirklichen Verhältnissen entgegengesetzte Tiefenauslegung auf (Versuchsanordnung von Heine[193]).

Der Beobachter blickt von A aus (Figur 22) in der Richtung des Pfeils durch einen horizontalen Schlitz in einem Schirm, der ihm die Anordnung sonst verdeckt, nach

*) Das Stroboskop samt den zugehörigen 7 Streifen mit Zeichnungen ist bei F. von Rossen, Amsterdam, erhältlich.

zwei Stricknadeln, die in 1 und 2 aufgestellt sind. Die Fortsetzung der Schiene a b c wird mit seiner Schulter derart verbunden, daß sie deren Bewegung mitmachen muß. Dabei kann eine Drehung um die Achse a, b oder c erfolgen. 1 ist in der skizzierten Weise mit c, 2 mit a gelenkig verbunden. Bewegt sich der Beobachter nach rechts, so nimmt der seitliche Abstand der beiden Stricknadeln nicht zu, sondern ab, und es scheint sich 2 vorn, 1 hinten zu befinden.

Über die Frage, ob die **Akkommodation** des Auges und die damit verbundene **Konvergenz** eine Beurteilung der Entfernung der Objekte gestattet,

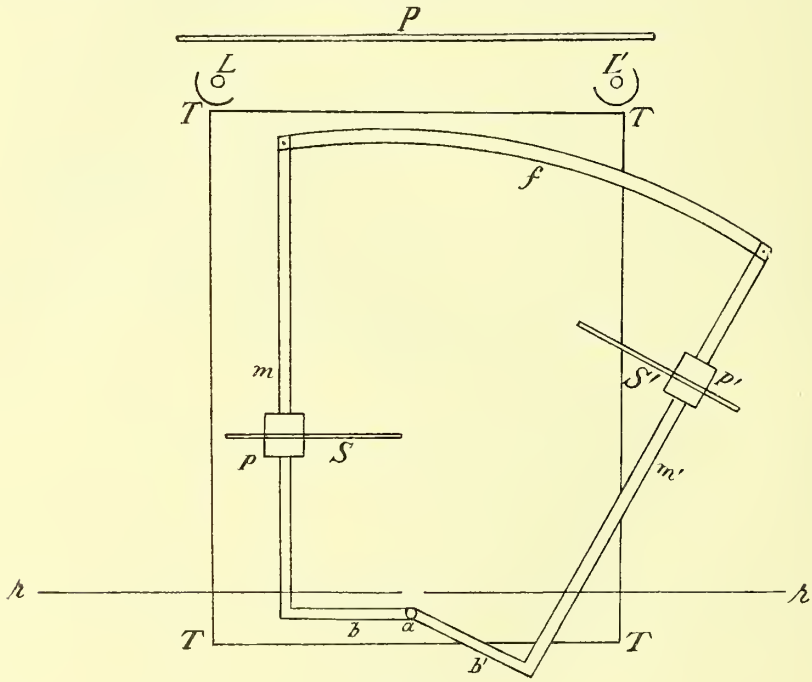


Fig. 23.
Nach Hillebrand[198], S. 109).

kann man gleichfalls nur durch Beobachtungen mit einem Auge, also bei Ausschluß der binokularen Tiefenwahrnehmung, Aufschluß erhalten. Die bis heute zweckmäßigste Versuchsanordnung ist von Hillebrand[198]) angegeben worden*). Baird[167]), welcher über die ganze Geschichte des Problems eingehend berichtet, hat sie nur ganz unwesentlich modifiziert.

In Figur 23 ist der Grundriß der Versuchsanordnung in schematischer Weise wiedergegeben. „Auf der horizontalen Tafel T ist in a eine vertikale Achse angebracht, um welche die beiden der Platte aufliegenden Leisten b und b′ drehbar sind. Mit diesen Leisten sind die 1 m langen und in mm geteilten Maßstäbe m und m′ in rechten Winkeln fix verbunden. Die beiden parallelepipedischen Stücke p und p′ lassen sich in einer Schlittenführung längs den Maßstäben verschieben und ist ihre jeweilige Stellung an

*) Kritik derselben bei Arrer[166]) und Wundt[255]). Replik von Hillebrand[199]).

der mm-Teilung ablesbar. Die Stücke p und p′ tragen in einer Einkerbung je einen vertikalen Holzrahmen, deren Grundrisse in der Zeichnung durch S und S′ dargestellt sind. Auf der dem Beobachter zugekehrten Seite sind diese Rahmen mit schwarzen, ganz ebenen und gleichmäßigen Kartons überklebt, welche auf der Medianseite etwas über die Rahmen hinausragen. Diese überragenden Kanten sind haarscharf geschnitten, so daß keinerlei Details (Papierfasern oder Abweichungen von der geraden Linie) gesehen werden können*). Hinter dem Apparate steht die große weiße, mattgeschliffene Milchglasplatte P, welche von den beiden Lampen L und L′ hell erleuchtet wird." Hohe, halb offene Eisenblechzylinder lassen das Licht bloß auf die weiße Tafel P fallen; im übrigen ist der Raum verdunkelt. „Lotrecht über der Achse a ist ein kurzer (in der Figur nicht abgebildeter) Tubus angebracht, dessen vom Beobachter abgewandtes Ende durch ein oblonges Diaphragma von 1 cm Breite und 1,5 cm Höhe abgeschlossen ist. Der Tubus ist so orientiert, daß der mittlere Knotenpunkt des angelegten Auges vertikal über den Drehpunkt a des ganzen Systems zu liegen kommt. Außerdem ist der große vertikale Pappschirm r r aufgestellt, der an passender Stelle ein Loch trägt, durch welches der Tubus herausragt. Denken wir uns nun zunächst etwa das rechtsseitige Schienensystem samt Rahmen und Schirm weg, und das linksseitige in der durch die Figur versinnlichten Stellung befindlich; die vertikale scharfe Kante des Kartonschirms S liegt dann in der Symmetrieebene des ganzen Apparates. Blickt der Beobachter durch den Tubus, so wird das oblonge Diaphragma zur Hälfte von dem schwarzen Kartonschirm optisch ausgefüllt, zur anderen Hälfte von der hellbeleuchteten Milchglastafel. Der Beobachter sieht also rechts von der Symmetrieebene ein hellerleuchtetes oblonges Feld, dessen linke Seite dann als scharfe gerade Linie erscheint, wenn er eben für die Entfernung des Kartonschirmes akkommodiert ist. Da dieser Schirm auf dem Maßstabe verschieblich ist, so kann man ihm vom Nahepunkt des Beobachters bis zu 1 m jeden beliebigen Abstand geben und daher in diesem Intervalle jede beliebige Akkommodation veranlassen. Die Größe des Diaphragmas ist so gewählt, daß der Beobachter keine weiteren Bestandteile des Apparates oder sonstige Objekte sehen kann."

Der Rahmen mit dem schwarzen Karton kann nun kontinuierlich verschoben werden, währenddem die Kante vom Beobachter andauernd fixiert wird. Dabei ist zu beachten, daß alle Bewegungen des Kopfes während der Beobachtung ausgeschlossen werden, was vor allem durch festes Anlegen der Umgebung des Auges an den Tubusrand zu erreichen ist. Ferner müssen erkennbare Details an den Kanten sehr sorgfältig vermieden werden, da die Entfernung oder Annäherung der Kante in diesem Falle aus der Höhenänderung des Details erschlossen werden kann. Endlich muß durch Verstopfen der Ohren ein Erraten der Bewegung aus den begleitenden Geräuschen verhindert werden.

Man kann ferner die fix verbundenen Schienen b und m so um ihre Achse drehen, daß der ganze Karton aus dem Sehfelde des Beobachters verschwindet; in dieser Lage kann man dem Kartonschirm eine beliebige Stellung auf der Schiene m geben und ihn dann rasch in das Gesichtsfeld hineinschieben.

Schließlich können noch beide Schirme unmittelbar nacheinander verwendet werden. „Die beiden Schienen m und m′ lassen sich durch den Bogen f verkoppeln, dessen Größe so gewählt ist, daß die scharfen Kanten der beiden Schirme nie gleichzeitig im Gesichtsfelde erscheinen können, daß aber in dem Augenblick, in welchem die eine das Gesichtsfeld verläßt, die andere in dasselbe eintritt." Jede Kante kann natürlich in beliebige Entfernung vom Beobachter gebracht werden, und dieser hat anzugeben, ob ihm die zweite Kante näher, gleichweit oder ferner erscheint, als die erste.

Am Apparat von Baird waren die beiden Schirme aus eingelegtem Holz mit einer scharfen geraden Messingkante hergestellt. Ferner wurde, um das Geräusch beim Hin- und Herschieben auszuschalten, der Schirm auf einen Wagen mit gekehlten Rädern gesetzt, welche auf glatten Schienen rollten. Eine zweite derartige Führung wurde auch oben am Schirme angebracht.

---

*) Die Kanten werden am besten mit schräg gehaltenem scharfen Skalpell geschnitten, so daß die Schnittfläche nicht senkrecht, sondern schräg gegen die große Kartonfläche steht, und zwar in dem Sinne, daß sie dem Beobachter abgewandt ist und dieser also eine möglichst vollkommen scharfe Kante sieht.

B. Binokulare Tiefenwahrnehmung.

Allgemeine Methodik der Untersuchung. Um die binokulare Tiefenwahrnehmung rein für sich ohne Beimengung der schon beim Sehen mit einem Auge wirksamen Motive der Tiefenauslegung untersuchen zu können, sind eine Anzahl von Versuchsanordnungen ausgearbeitet worden, welche mit geringen Modifikationen sehr vielseitig verwendet werden können. Sie sollen daher hier gemeinsam behandelt werden, so daß bei der Besprechung der Einzelfragen kurz auf sie hingewiesen werden kann.

Methode 1. Beide Augen beobachten die gleichen Objekte, welche keine Anhaltspunkte für monokulare Tiefenauslegung bieten.

Man hängt mehrere durch Gewichte gespannte feine Fäden oder feine Drähte von verschiedener Stärke in Abständen von einigen cm so nebeneinander auf, daß sie sich gut von einem entfernten, gleichförmigen und ebenen Hintergrunde abheben, leicht und unter Vermeidung von zu starkem Pendeln (die Gewichte tauchen zur Dämpfung in Gefäße mit Glyzerin hinein), um meßbare Beträge nach vorn und hinten verschoben werden können, und betrachtet sie durch eine kurze Röhre, welche beiden Augen das obere und untere Ende der Fäden verdeckt (so Hering[3]), S. 289; R. S. 394; Helmholtz hatte zu dem gleichen Zwecke — Aufsuchung des Längshoropters — vorher schon Nadeln verwendet, siehe O. S. 801). Dieses Prinzip liegt folgenden speziellen Versuchsanordnungen zugrunde:

a) Hillebrand[197]) befestigte neben einander 3 vertikale Kokonfäden ohne unterscheidbare Merkpunkte an je einem Bügel, welche in Schlitzen einer Metallplatte nach vorn und hinten verschieblich waren. Zwischen die vertikalen Stücke der Bügel und die Kokonfäden wurde ein gleichmäßiger schwarzer Schirm als Hintergrund gestellt, zwischen die Fäden und die Augen ein Karton mit einem rechteckigen Fenster. Der Kopf wurde mit einem Halter so fixiert, daß der bewegliche Mittelfaden genau in der Medianebene lag. Zu Beobachtungen aus größerer Ferne wurden entsprechend dickere Fäden verwendet.

b) Heine[187]) verwendete statt der Fäden drei dünne in eine Glyzerindämpfung eintauchende Metallstäbe,*) welche in einem Gestell angebracht waren, das auf einer 5 m langen optischen Bank verschieblich war. Der Mittelstab läßt sich mittels Zahn und Trieb längs eines Maßstabes nach vorn und hinten verschieben, der seitliche Abstand der beiden äußeren Stäbe ist ebenso in der Frontalebene veränderlich. Den Hintergrund bildete eine gleichmäßige Fläche, deren Helligkeit verschieden abgestuft werden konnte. Alle Einzelheiten des Apparates, insbesondere die oberen und unteren Enden der Stäbe waren durch passende Diaphragmen ohne gerade vertikale Konturen, deren Durchmesser, sowie die Dicke der Stäbe im Verhältnis von 1:2:4 variiert wurden, abgedeckt.

c) Analoge Versuchsanordnungen von Bourdon und Pulfrich, nur für einen bestimmten Zweck gebraucht, siehe unten S. 164.

2. Haploskopische Methoden (binokulare Vereinigung des Inhalts zweier gesonderter Gesichtsfelder).

*) Man vermeide durch entsprechende Abblendung eine Lichtspiegelung an den (am besten mattierten) Stäben!

Einzelne Versuchsanordnungen:

a) Binokulare Vereinigung der Bilder zweier gesonderter Objekte (stereoskopischer Halbbilder: gleicher Münzen u. Ähnl.), die auf einem gleichmäßigen Grunde liegen, durch „freiäugiges Stereoskopieren“ ohne Apparat mit vor den Objekten gekreuzten oder mit parallelen Gesichtslinien. Im ersteren Falle benutze der Anfänger eine Bleistiftspitze oder Ähnliches als Fixationspunkt. Wegen der Beanspruchung der relativen Akkommodationsbreite wird der Myop bei parallelen Gesichtslinien am besten ohne Brille, bei gekreuzten Gesichtslinien mit Brille stereoskopieren.

Erleichtert wird das Aufsuchen der passenden Augenstellung bei der

b) Haploskopie unter Benutzung besonderer Vorrichtungen.*)

α) Farbenhaploskopie. Man zeichnet auf einen dunklen Grund zwei stereoskopische Halbbilder, das eine mit roter, das andere mit grüner Farbe, und setzt nun vor ein Auge ein rotes Glas, welches die roten Strahlen durchläßt, die grünen absorbiert, vor das andere Auge ein grünes Glas, welches umgekehrt die roten Strahlen absorbiert, die grünen durchläßt. Man sieht dann ein zwar doppelfarbiges (teils rotes, teils grünes) Bild, das aber einen lebhaften stereoskopischen Effekt gibt. Der farbige Eindruck wird übrigens durch Adaptation stark herabgesetzt. Auch ist es nicht nötig, daß das Licht vom falschen Bilde ganz absorbiert wird, es genügt, wenn es stark abgeschwächt wird. Mittels eines sehr lichtstarken Doppel-Projektionsapparates kann man so einem größeren Auditorium stereoskopische Demonstrationen vorführen, wenn man mit jedem Apparat ein leuchtendes stereoskopisches Halbbild projiziert, vor den einen Apparat ein rotes, vor den anderen ein grünes Glas vorsteckt und die Zuschauer Klemmer mit einem roten und einem grünen Glase aufsetzen läßt. Diese von d'Almeida zuerst[165]) angegebene Methode ist jüngst von Hering[196]) weiter ausgebildet worden.

Zeichnet man ein blaues und ein rotes Stereoskopenhalbbild auf weißen Grund und setzt wieder vor ein Auge ein rotes Glas, welches die blauen Strahlen, und vor das andere Auge ein blaues Glas, welches die roten Strahlen absorbiert, so sieht umgekehrt wie vorhin das „rot bewaffnete Auge nur das objektiv blaue, das blau bewaffnete Auge nur das objektiv rote Bild deutlich“ (vergl. die theoretische Entwicklung bei Hering[196]), S. 232). Dies ist die Grundlage einer anderen Methode, die zuerst von Rollmann[237]) angegeben wurde, und nach welcher neuerdings unter dem Namen „Anaglyphen“, „Stereograph“ u. s. f. übereinander gedruckte farbige Stereoskophalbbilder in den Handel gebracht werden (Grützner[184])). Zur Projektion eignen sich die vom Photographen Petzold (Charlottenburg) mittels Chromgelatine und Anilinfarben hergestellten farbigen Diapositive: Zwei passend übereinander gelegte stereoskopische Halbbilder, ein grünes und ein rotes, werden mit einem Apparate projiziert und von den Zuschauern durch beigegebene farbige Gelatineblätter betrachtet**). Weiteres darüber sowie über andere Methoden

*) Auf alle Einzelkonstruktionen solcher Vorrichtungen einzugehen ist unmöglich, und mit Rücksicht auf den speziellen Zweck, die Untersuchung des Raumsinnes des Auges, auch nicht nötig. Eine ausführliche Geschichte der Entwicklung der stereoskopischen Technik bis zum Jahre 1900 bietet M. von Rohr[233]), auf dessen Angaben ich mich in allen jenen Fällen beziehe, wo mir die Originalarbeiten nicht zugänglich waren

**) Solche Diapositive liefert auch M. Skladanowsky, Berlin N., Schwedterstr. 35a.

stereoskopischer Projektion findet man bei F. Best[169]). Über Andertons Projektionen mit polarisiertem Licht siehe M. v. Rohr([233]), S. 163).

Physiologische Anwendung findet die Methode der Farbenhaploskopie (nicht — Stereoskopie) ferner bei der Untersuchung der freien Einstellung der Augen (siehe unten S. 205).

β) Das Wheatstonesche Spiegelstereoskop (Wheatstone[251]). Das Konstruktionsprinzip des Apparates ist mit Rücksicht auf später (S. 174) zu besprechende Verhältnisse in Figur 24 wiedergegeben. E F und F G sind zwei unter 45° gegen die Sagittale geneigte, im Gestelle A B C D befestigte Planspiegel, a b c und a′ b′ c′ je 3 Punkte oder Querschnitte von Strichen, welche für das in K_1 bezw. K_2 befindliche linke, bezw. rechte Auge durch E F und F G nach $\alpha\beta\gamma$ bezw. $\alpha'\beta'\gamma'$ gespiegelt werden.

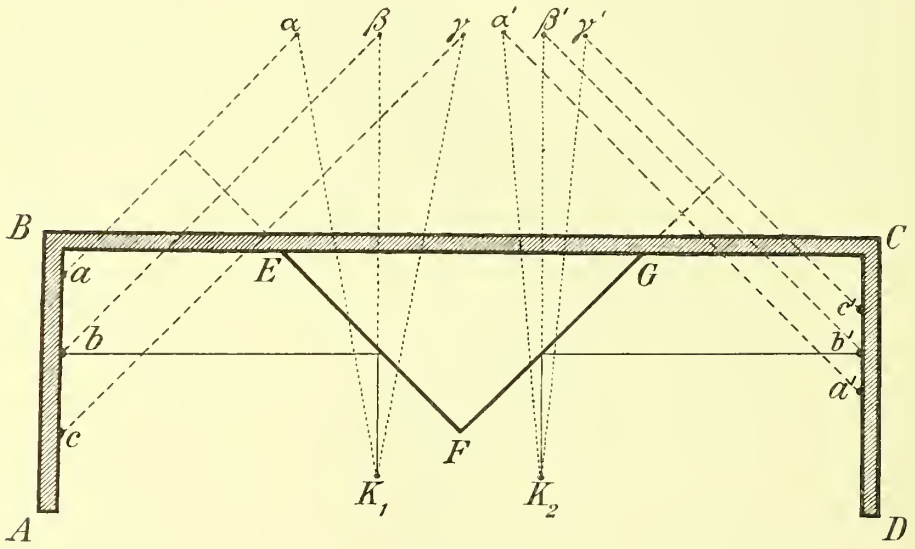


Fig. 24.

Das Wheatstonesche Spiegelstereoskop ist wegen seiner einfachen und übersichtlichen Konstruktion zur Untersuchung des Binokularsehens am meisten geeignet. Am vielseitigsten verwendbar ist eine schon von Wheatstone[252]) angegebene Modifikation, welche gestattet, sowohl die Entfernung der Halbbilder vom Auge, als auch den Konvergenzwinkel der Gesichtslinien unabhängig voneinander zu variieren. Unter Anwendung eines ähnlichen Prinzips hat dann Hering sein

γ) Spiegelhaploskop konstruiert, welches man wohl als das Universalinstrument zum Studium des Binokularsehens bezeichnen darf. Angabe des Prinzips bei Hering (R. S. 393), Beschreibung verschiedener Ausführungen des Apparates bei Pereles[339]) und Hillebrand[197]). Das Heringsche Haploskop unterscheidet sich vom beweglichen Spiegelstereoskop Wheatstones dadurch, daß bei ihm jeder der beiden Spiegel samt dem zugehörigen Halbbilde um eine besondere, durch den Drehpunkt des entsprechenden Auges

gehende Achse drehbar ist. Der Apparat wird von R. Rothe (Leipzig) in zwei Modifikationen gebaut, von denen ich hier zunächst die einfachere, für die meisten Versuche ausreichende beschreibe.

Auf einem halbkreisförmigen Metallrahmen A B C in Figur 25 sind zwei um die Achse D, bezw. D′ drehbare Metallschienen D E und D′ E′ angebracht, von denen jede an einem Träger H (H′) einen verstellbaren Planspiegel S (S′) und auf dem verschieblichen Schlitten O (O′) einen Rahmen R (R′) trägt. In die Rahmen R und R′ sind zunächst Glasplatten P und P′ hereingesteckt, auf welchen je eine Vertikallinie v (v′) und eine sie kreuzende Horizontallinie gezeichnet ist. Die Glasplatten können entfernt und statt ihrer Kartonscheiben oder andere Glasplatten mit beliebigen Zeichnungen eingeschoben werden.

Die Schienen D E und D′E′ lassen sich nach Lockerung der Schrauben b und b′ eine Strecke weit nach rechts und links von der Mitte weg verschieben. Sie werden so eingestellt, daß die Entfernung ihrer Drehungsachsen D D′ gleich ist dem Abstande der Drehpunkte der beiden Augen des Beobachters voneinander*),

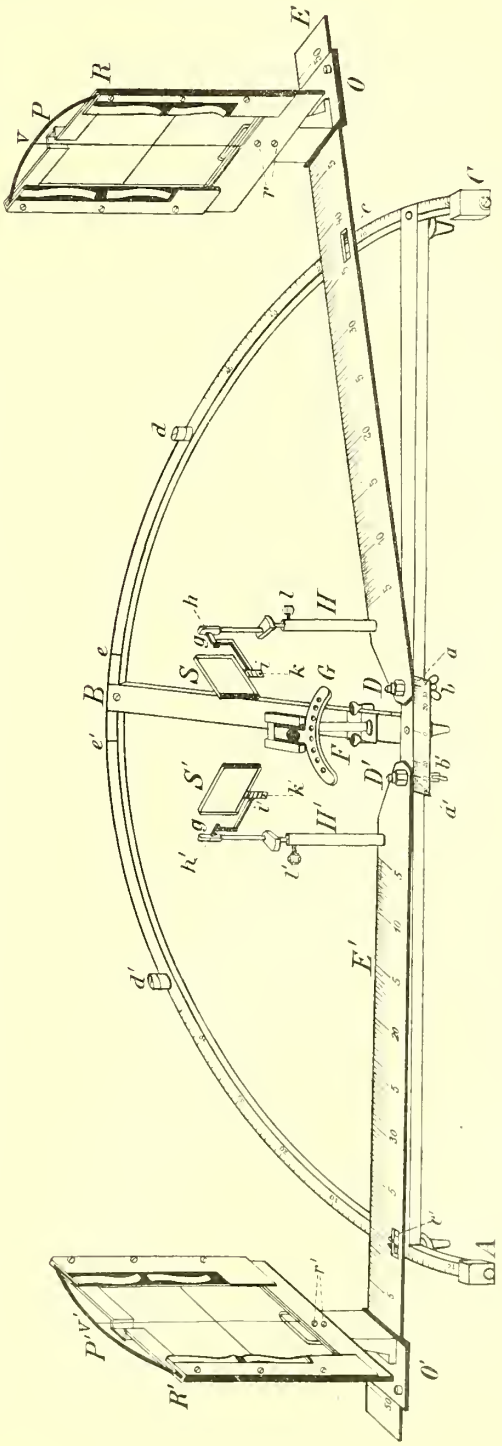


Fig. 25.

*) Den Abstand beider Augen voneinander mißt man, wenn man mit fixiertem Kopf in einen Spiegel sehend vor die Augen zwei in einer frontalparallelen Ebene verschiebliche Lote bringt und letztere so lange verschiebt, bis sich

d. h. es wird von der Mitte des Apparates aus auf jeder Seite die halbe Länge der Grundlinie der Augen mit den Zeigern a und a′ an einer Mm-Teilung eingestellt und darauf diese Stellung durch Anziehen der Flügelschrauben b und b′ fixiert. Die Spiegel S und S′ werden so justiert (siehe unten!), daß sie zur Längsachse der Schienen D E und D′ E′ in einem Winkel von 45° stehen. Stellt man die Schienen D E und D′ E′ mit ihrer Längsachse in die quere (frontalparallele) Richtung, so bilden dann die Spiegelflächen auch mit den parallel geradaus gestellten Gesichtslinien der über D und D′ stehenden Augen einen Winkel von 45°, und die Stellung der Augen, der Spiegel S, S′ und der Spiegelbilder der in den Rahmen R und R′ angebrachten Objekte entspricht dann dem Schema der Figur 26 a. Die Einstellung der Schienen in rein quere, frontalparallele Richtung wird an den Fenstern c und c′ kontrolliert, indem der vordere zugeschärfte Rand der Fenster c und c′ auf die mit 0 bezeichneten Striche der Gradteilung des Halbkreises eingestellt wird. Werden die Schienen D E und D′ E′ (natürlich samt ihren Spiegeln und Objekten) von dieser Nullstellung aus beide um den gleichen Winkel gegen die Anschläge d d′ hin gedreht (so wie es in Figur 25 auf der rechten Seite gezeichnet ist), so resultieren daraus die in Figur 26 b schematisch wiedergegebenen Verhältnisse: eine symmetrische Konvergenz der Gesichtslinien, wobei aber die beiden Bildebenen $\alpha\beta\gamma$ und $\alpha'\beta'\gamma'$ nach wie vor zu der auf die Mittelpunkte β

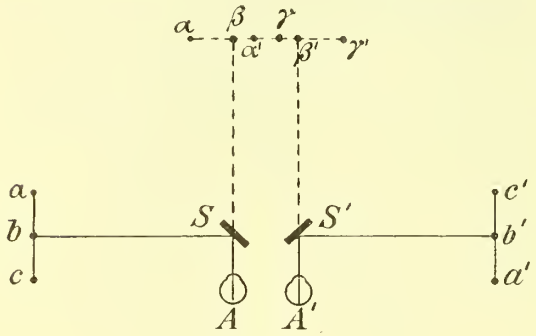


Fig. 26 a.

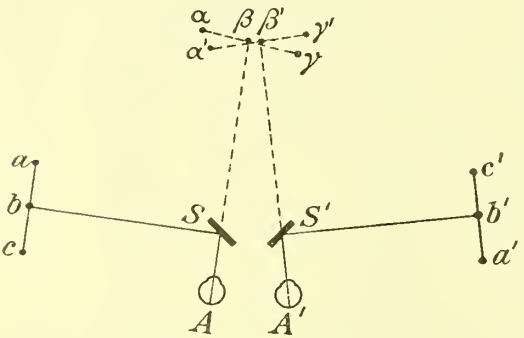


Fig. 26 b.

für jedes Auge das vor ihm befindliche Lot mit seinem Spiegelbilde deckt (nnd zugleich durch die Mitte des Spiegelbildes der Pupille verläuft). Nach einem analogen Prinzip konstruierte Augenabstandsmesser, zur Verwendung bei sich selbst bezw. bei anderen Personen bringt die Firma Zeiss in den Handel (vgl. Dönitz, Z. f. Instrumentenk. 1901, S. 260). Eine weitere Methode besteht darin, daß man mit festgestelltem Kopfe einen fernen median gelegenen Punkt fixiert, und nun in die Gesichtslinie jedes Auges die in einer frontalparallelen Ebene verschiebliche Spitze eines ruhig gehaltenen Stangenzirkels bringt (Kontrolle durch Visieren bei abwechselndem Verdecken eines Auges).

und β' eingestellten Gesichtslinie senkrecht stehen bleiben. Der Grad der eingestellten Konvergenz ist am vorderen Rande der Ausschnitte c und c′ an der Gradteilung des Rahmens ablesbar. Durch ungleich große Drehung der Schienen kann man eine beliebige unsymmetrische Konvergenz erzeugen. Ferner kann man die Schienen von der Nullstellung aus auch gegen die Anschläge A und C hin drehen und so Divergenzstellungen der Gesichtslinien (symmetrische und unsymmetrische) herbeiführen. Durch Verschieben der Schlitten O und O′ auf den Metallschienen kann die Entfernung der Objekte vom Auge beliebig geändert werden. Ihr Abstand vom Spiegel wird an der gegen die Mitte des Apparates gerichteten zugeschärften Kante des Schlittens an der Mm-Teilung der Schiene abgelesen. Die Fixation des Kopfes erfolgt entweder mittels einer Stirnstütze, welche an der Mittelstange des Apparates bei F verschieblich angebracht ist und in der richtigen Stellung mit Schrauben fixiert wird. Zuverlässiger ist die Fixierung durch ein Beißbrettchen G, das im Schlitten F befestigt ist. Man schiebt den Schlitten F soweit vor, bis die ungefähr in der Verbindungslinie der beiden äußeren Augenwinkel liegenden Drehpunkte der Augen über D und D′ zu liegen kommen.

Der Apparat wird genau justiert geliefert, und es ist zu empfehlen, sich bei Nachjustierungen, wenn z. B. an die Spiegel gestoßen worden ist, bloß auf die unten erwähnten Drehungen um die Achsen g h (g′ h′) und i k (i′ k′) zu beschränken. Sollte aber aus irgend einem Grunde eine weitergehende Justierung erwünscht sein, so kann man sie in der unten beschriebenen Weise vornehmen, wobei aber zu bemerken ist, daß diese Justierung nur dann ganz genau ist, wenn die spiegelnden Flächen gerade in der Verlängerung der Achsen i k und i′ k′ liegen. Eventuell kann es sich empfehlen, die Glasspiegel nach Hess[318]) durch entsprechend gelagerte totalreflektierende Prismen zu ersetzen. Man hat dabei noch den Vorteil, daß die matten, von der Vorderfläche des Glases herrührenden Spiegelbilder wegfallen. In diesem Falle geht man nun so vor: Zunächst stellt man mit der Libelle den Metallrahmen des Instrumentes nach allen Seiten horizontal, macht D D′, wie oben angegeben, gleich dem gegenseitigen Abstande seiner Augen und stellt die Schienen D E und D′ E′ beiderseits auf Null ein. Auf den beiden Schienen findet man neben dem Teilstrich 390 einen kleinen Punkt, dessen Entfernung von der vorderen (zum Ablesen benutzten) Kante des Fensters c (c′) gleich sein soll der Entfernung der Drehungsachse i des Spiegels vom Drehpunkt D. Man erreicht diese Einstellung am einfachsten in der Weise, daß man jederseits auf den Punkt bei 390 ein Lot einstellt. Zu diesem Zwecke sind Lote mit unten konisch zugespitzten Gewichten beigegeben. Zweckmäßig sind auch die unten S. 166 beschriebenen Einstelllote nach Tschermak. Dann spannt man dicht neben den Lotfaden vorbei einen Querfaden aus und dreht nun nach Lüftung der Schrauben l und l′ die Spiegelhalter so, daß die Achsen i und i′ genau in einer Querebene mit den beiden seitlichen Lotfaden stehen*).

*) Am fertig justiert gelieferten Apparat, an welchem die Rahmen R (R′) richtig eingestellt sind, genügt es, einen Querfaden vom oberen Ende des Vertikalstrichs v nach v′ auszuspannen und sich davon zu überzeugen, daß die Spiegelachsen i und i′ gerade unter den Fäden liegen.

Nunmehr handelt es sich darum, die Spiegel S und S′ unter 45° gegen die Längsachse der Schienen D E und D′ E′ zu stellen. Dies erreicht man auf folgende Weise: Man hängt am hinteren Rande des Metallhalbkreises bei e und e′ vor einem hellen Hintergrunde zwei schwarze, belastete Fäden symmetrisch zur Medianebene des Apparates so auf, daß die Distanz ee′ wieder gleich ist dem gegenseitigen Abstand der Augen des Beobachters. Dann mißt man den Abstand dieser Lote von der durch den Querfaden bezeichneten Ebene der Spiegelachsen i und i′, verschiebt die beiden seitlichen Lote längs dem Querfaden soweit, bis ihr Abstand von der Spiegelachse der gleiche ist, wie der der hinteren Lote und gibt ihnen ebenfalls einen hellen Hintergrund. Bringt man nun das rechte Auge in einige Entfernung (nicht zu weit!) vor den Spiegel S, so sieht man im Spiegel das Spiegelbild des rechten seitlichen Lotes, über und unter dem Spiegel den Lotfaden bei e. Bei richtiger Einstellung des Spiegels S muß das Spiegelbild des rechten Lotes genau das vom Spiegel verdeckte Mittelstück des oben und unten sichtbaren Lotes e ergänzen. Erscheint das Spiegelbild parallel nach rechts oder links verschoben, so dreht man den Spiegel bei i um die vertikale Achse i k. Zu diesem Behufe ist bei i ein Loch angebracht, in welches man eine starke Nadel hineinsteckt und die nötige Drehung ausführt. Bildet das Spiegelbild mit der Richtung des Fadens bei e einen Winkel, so steht die Spiegelebene nicht genau vertikal. Man besorgt die richtige Einstellung durch Drehung bei g um die horizontale Achse gh. Steht S richtig, dann ist S′ ganz ebenso zu justieren. Sind beide Spiegel richtig eingestellt, dann schiebt man die Glasscheiben P und P′ in die Rahmen R und R′ und überzeugt sich zunächst durch Vergleich mit den beiden seitlichen Loten, daß die Striche v und v′ wirklich genau vertikal stehen. Sollte das nicht der Fall sein, so korrigiert man ihre Stellung durch Drehung der Rahmen R und R′ nach Lockerung der beiden Schrauben bei r und r′. Sodann bringt man die Vertikalstriche an die Stelle der beiden seitlichen Lotfäden und kontrolliert, ob ihr Spiegelbild ebenfalls genau in die Verlängerung der über und unter dem Spiegel sichtbaren hinteren Lotfäden fällt. Wenn eine seitliche Verschiebung notwendig sein sollte, kann man sie dadurch erreichen, daß man zwei auf der Rückseite des Schlittens O (O′) befindliche (in Figur 25 nicht sichtbare) Schrauben lockert und den Rahmen R (R′) quer zur Längsrichtung der Schiene verschiebt.

Eine andere Kontrolle dafür, ob die Spiegel unter 45° gegen die Längsrichtung der Schiene D E (D′ E′) geneigt sind, besteht in folgendem (vergl. Pereles[339]), Hillebrand[197])): Man stellt die Schienen D E und D′ E′ jederseits auf 45° der Gradteilung ein. Dann müssen die Spiegelebenen sagittal und parallel zur Medianebene des Apparates stehen. Das läßt sich sehr einfach dadurch kontrollieren, daß man rechts und links in einer genau queren Ebene — z. B. an identischen Strichen der Gradteilung — je ein Lot herabhängen läßt. Visiert man dann gegen einen hellen Hintergrund von einem Lot zum anderen (wobei man ein weißes Blatt unter die beiden Augen hält), so muß das im Spiegel sichtbare Stück des Lotfadens mit diesem und dem Faden der anderen Seite zusammenfallen.

Für feinere Untersuchungen wird eine stabilere Form des Haploskops gebaut, deren erste Konstruktion bei Hillebrand[197]) beschrieben ist, die

aber neuerdings noch in mehrfacher Hinsicht verbessert worden ist. Die wichtigsten Unterschiede gegenüber dem einfachen Modell sind folgende: Statt des einfachen Metallrahmens A B C in Figur 25 sind beiderseits zwei volle Metallsektoren von 45° angebracht, welche zur Einstellung auf Augendistanz mitsamt den Schienen auf einer soliden Unterlage verschoben werden können. Auf die Schlitten O und O′ können zwei verschiedene Rahmen aufgesetzt werden. Der eine davon, für Glasplatten und Kartonscheiben bestimmt, gleicht dem in Figur 25 gezeichneten. Nur erfolgt die Vertikalstellung des Mittelstrichs mittels einer horizontalen Schraube mit großem, gegen die Medianebene des Apparates hin gerichtetem Schraubenkopf. Die Ablesung an der Mm-Teilung der Schiene geschieht an der hinteren von der Medianebene des Apparates abgewandten Kante des Schlittens. Der zweite Rahmen, der gegen den beschriebenen ausgetauscht werden kann, besitzt die von Hillebrand[197]) beschriebene Vorrichtung*) mit drei vertikalen Fäden (Frauenhaare). Der Mittelfaden ist fest, die beiden seitlichen können jeder einzeln für sich mittels Schraubenspindeln meßbar nach der Seite zu verschoben werden. Eine Neuerung gegenüber der ersten Konstruktion besteht darin, daß jetzt die Schraubenspindeln der beiden Seitenfäden miteinander verkoppelt werden können, wodurch eine gemeinsame seitliche Verstellung beider Seitenfäden gegenüber dem festen Mittelfaden ermöglicht ist. Diese Einrichtung soll die technisch schwierige isolierte Verschiebung des Mittelfadens gegenüber den beiden Seitenfäden ersetzen.

Die Beschreibung eines anderen Haploskops, welches Beobachtungen bei verschiedener Neigung der Blickebene gestattet, findet man unten S. 202ff.

δ) Das Brewstersche Prismenstereoskop (Brewster[172]). In diesem werden mittels prismatischer Konvexlinsen (die beiden auseinander geschnittenen Hälften einer Volllinse), p_1 und p_2 in Figur 27 den in K_1 und K_2 befindlichen Augen die Objekte a b c und a′ b′ c′ ungefähr (die Zeichnung ist nicht sehr genau) in $\alpha\beta\gamma$, bezw. $\alpha'\beta'\gamma'$ abgebildet — durch die Prismenwirkung im wesentlichen seitlich übereinander geschoben, durch die Linsenwirkung in die Ferne gerückt. Prismen- und Linsenwirkung sollen dabei so miteinander harmonieren, daß der Konvergenz der Gesichtslinien etwa auf $\beta = \beta'$ auch die diesem Konvergenzwinkel zugehörige Akkommodation entspricht. Das Prismenstereoskop ist schon wegen der Bildverzerrung durch die Prismen für physiologisch-optische Untersuchungen wenig geeignet, dagegen ist es, insbesondere in der sogenannten „amerikanischen Form", bei welcher die Stereoskopbilder auf einer Schiene dem Auge genähert, bezw. von ihm entfernt werden und so leicht für verschiedene Personen die zum Refraktionszustande passende Stellung aufgesucht werden kann, sehr beliebt zur Betrachtung stereoskopischer Bilder, bei welcher größere Genauigkeit nicht verlangt wird.

ε) Das Linsenstereoskop, angedeutet von Wheatstone[252]) (vergl. v. Rohr[233]), S. 68 ff.), ausgeführt von Helmholtz (O. S. 829), in welchem jedes stereoskopische Halbbild durch eine vollständige, zentrisch benutzte Konvexlinse, nicht durch Halblinsen betrachtet wird. Es ist besonders in der vollendeten Ausführung, welche es in letzter Zeit durch die Firma Zeiss erhalten hat, das geeignetste Instrument zur Betrachtung stereoskopischer Aufnahmen mit

*) Vergl. auch die Abbildung im Katalog von Spindler und Hoyer.

Linsen kurzer Brennweite. Für physiologisch-optische Untersuchungen steht es hinter dem Heringschen Haploskop, welches eine reichere Variation der Versuchsbedingungen gestattet, zurück.

η) „Stereoskopisches Sehen durch Farbendifferenz" (zuerst Brewster, vergl. v. Rohr[233]), S. 48) tritt infolge der Chromasie des Auges und der bei den meisten Menschen vorhandenen Abweichung der optischen Achse des Auges von der Pupillenmitte ein, wenn man auf lebhaft-farbigem blauem Grunde eine Figur von lebhaft roter oder gelber Farbe (oder umgekehrt) anbringt. Erklärung von Einthoven[178]). Schapringer[240]) bringt damit die Erscheinung der „fluttering hearts" in Zusammenhang. Über die Farbenstereoskopie beim Vorsetzen von Prismen oder den exzentrischen, prismatisch wirkenden Partien von Brillengläsern vor das Auge siehe Einthoven (l. c.), Kirschmann[209]), Exner[183]), Jensen[207]).

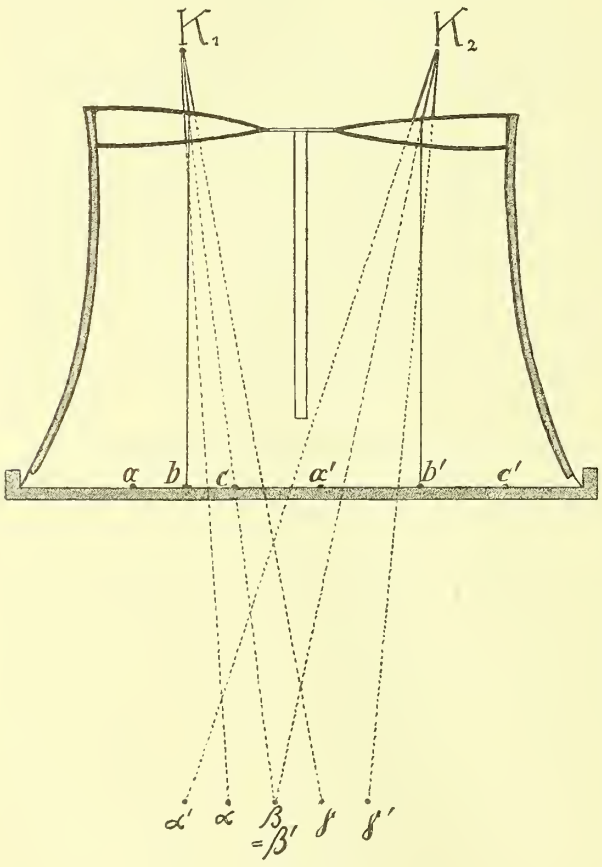


Fig. 27.

ϑ) Kurz hingewiesen sei ferner auf die Experimente, in welchen die stereoskopischen Halbbilder nicht gleichzeitig, sondern in raschem Wechsel nacheinander sichtbar gemacht wurden, insbesondere auf die „Strobostereoskopie" von d'Almeida[165]), Jaeger[205]), Guilloz[185]), Ewald und Gross[182]), wobei beide Stereoskopbilder naeheinander auf dieselbe Stelle projiziert werden oder im Stroboskop erscheinen und zugleich die Augen abwechselnd so verdeckt werden, daß jedes Auge stets nur das ihm zugehörige Bild sieht. Davidson benutzte die Anordnung für Röntgenbilder (vergl. M. von Rohr[233]), S. 166), allerdings mit pseudoskopischem Effekt.

a) Nachweis der binokularen Tiefenwahrnehmung und ihrer Unabhängigkeit von der monokularen Tiefenvorstellung.

Um das Vorhandensein der binokularen Tiefenwahrnehmung bei Ausschluß der monokularen Motive der Tiefenauslegung, insbesondere aber auch (mit Rücksicht auf Brückes Theorie der Tiefenwahrnehmung) bei Ausschluß jeglicher Augenbewegung nachzuweisen, sind verschiedene Methoden

verwendet worden. Indem ich bezüglich der historischen Entwicklung auf die Darstellungen von Helmholtz (O. S. 889), van der Meulen[219a]) und Hering (R. 407) verweise, führe ich folgende Methoden an: 1. Binokulare Tiefenwahrnehmung in Nachbildern. Literatur darüber bei Helmholtz (O. S. 891).

2. Momentanbeleuchtung stereoskopischer Zeichnungen, welche außer der Querdisparation keine Motive für Tiefenauslegung bieten (zuerst Dove, vergl. Aubert[1]), S. 315). Helmholtz (O. 710) benutzte hierzu einen hölzernen, innen schwarz angestrichenen Kasten A B C D in Figur 28. Bei f in der vorderen und bei g in der hinteren Wand waren in der Entfernung der beiden Augen voneinander je zwei Löcher eingebohrt. Durch die Löcher bei f blickt der Beobachter, vor g werden innen im Kasten die zwei stereoskopischen Halbbilder befestigt, welche an identischen Stellen mit einem Nadelstich durchbohrt waren. Diese Pünktchen waren bei mäßig verdunkeltem Zimmer im sonst ganz dunklen Kasten eben noch zu sehen und dienten als Fixationsmarken. Der Kasten ist an der unteren Seite, welche auf einer Tischplatte B D aufruht, offen. Wenn man die Zeichnungen wechseln will, dreht man ihn um und kann dann in ihn hineingreifen. Zur Zuleitung des Stromes dienen die Drähte h i, bei k springt der Funke über. Ein Kartonstreifen l, welcher auf der vom Beobachter abgewendeten Seite weiß ist, blendet das Licht des Funkens vom Auge des Beobachters ab und reflektiert es auf die Zeichnung. Die Funken wurden durch die sekundäre Spirale eines großen Ruhmkorff erzeugt, die mit den Belegen einer Leydener Flasche verbunden war. Schließung und Öffnung des Stromes der primären Spirale besorgte der Beobachter selbst.

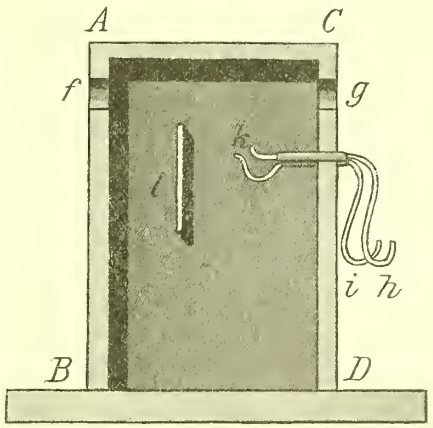


Fig. 28.
Nach Helmholtz (O. S. 710).

An Stelle der Beleuchtung mittels des elektrischen Funkens gab Volkmann[248]) für momentanes Sehen einen Apparat an, den er als Tachistoskop bezeichnete. Das zu betrachtende Objekt — in unserem Falle zwei auf einen Papierstreifen gezeichnete stereoskopische Halbbilder — ist von einer horizontalen, durch ein fallendes Gewicht beweglichen Metallplatte bedeckt. Die Platte ist mit zwei Fixationsmarken versehen, die genau über den Stellen der Zeichnungen liegen, welche fixiert werden sollen; ferner mit zwei Fenstern, deren jedes, sobald die Platte sich während der Fallzeit verschiebt, ein Halbbild sichtbar macht.*)

3. Direkte Beobachtung elektrischer Funken nach Donders. Im Dunkelzimmer wird durch rasch nacheinander zwischen zwei Kupferdrähten über-

* Ähnliche Tachistoskope sind für andere Zwecke vielfach konstruiert worden. Vergl. darüber das Kapitel über psychophys. Methoden in diesem Handbuch.

springende Fünkchen ein schwach leuchtender Fixationspunkt erzeugt. An einem veränderlichen Standort vor oder hinter der Frontalebene des Fixationspunktes läßt man zeitweilig einen einzelnen Öffnungsfunken von einem Ruhmkorff überspringen. Der Beobachter, dessen Kopf fixiert ist, hat durch verabredete Signale nach einem Nebenraume anzugeben, ob ihm der Öffnungsfunke vor oder hinter dem Fixationspunkte zu liegen scheint. Dieselbe Anordnung läßt sich auch in einem Dunkelkästchen anbringen, wobei an mm-Skalen die Entfernung des Öffnungsfunkens vom Fixationspunkt abgelesen werden kann (van der Meulen[219a]), S. 105ff.).

4. Der Fallversuch von Hering[195]), welcher im Heringschen Laboratorium jetzt in folgender Weise ausgeführt wird. Der Beobachter steckt

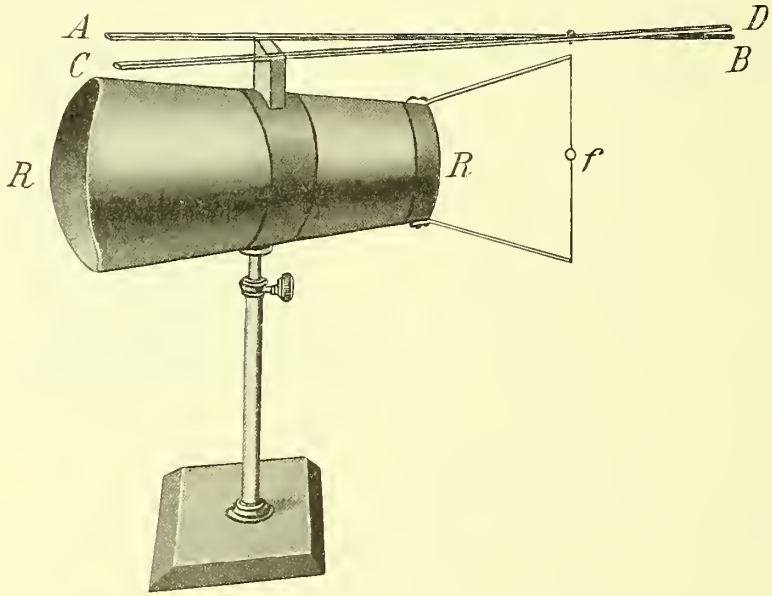


Fig. 29.
Nach einem von H. Geheimr. Hering zur Verfügung gestellten Photogramm.

sein Gesicht in die vordere Öffnung R einer weiten Pappröhre RR′, die von einem Halter getragen wird, und fixiert (mit einem bezw. mit beiden Augen) den Punkt f, eine Glasperle, welche in der Mitte eines vertikal ausgespannten Kokonfadens befestigt ist. Als Hintergrund wird ein weißer Schirm aufgestellt, der von der Seite her so beleuchtet sein muß, daß der Beobachter weder von der Anordnung noch von der fallenden Kugel einen Schatten sieht. Der Untersuchende läßt nun, nach einem zur Aufmerksamkeit auffordernden Zeichen („Jetzt!“) vor oder hinter f eine Marmor- oder Wachskugel herabfallen, und der Beobachter hat anzugeben, ob sie ihm vor, neben oder hinter der Frontalebene des Fixationspunktes zu fallen schien. Damit er bei Beobachtung mit einem Auge nicht etwa aus der Schallstärke beim Auffallen die Entfernung erschließt, breitet man auf dem Grunde Tücher (Watte) aus, welche den Schall dämpfen. Über dem Apparat sind zwei über f sich

kreuzende Holzschienen AB und CD angebraeht, welche bei R um die Augendistanz voneinander abstehen, und welehe verhindern, daß man die Kugel zufällig in der Gesichtslinie des einen oder des anderen Auges herabfallen läßt, weil dann für das betreffende Auge während des Falls entweder die Kugel das Fixationszeichen verdecken, oder bei größerer Entfernung der Kugel umgekehrt das Fixationszeichen vor der Kugel erscheinen würde. Eine Modifikation des Fallapparates siehe bei van der Meulen[219a]).

Statt der fallenden Kugeln kann man auch in einer sonst ähnliehen Anordnung, in weleher bloß der Fixationspunkt mit seiner Befestigung und die Schienen AB, CD fehlen, runde Metallstäbe versehiedener Dieke, die auf festen Füßen angebraeht sind, ins Gesichtsfeld hereinbringen, und sie so lange verschieben, bis sie der Beobachter in einer Frontalebene zu sehen glaubt (Modifikation von Methode 1, oben S. 150). Beim Sehen mit einem Auge wird der Beobaehter meist geneigt sein, sich bei der Einstellung der Stäbe durch ihre seheinbare Dicke beeinflussen zu lassen.

Diese von Hering zunächst nur zur Demonstration der binokularen Tiefenwahrnehmung angegebenen Versuche, speziell der Fallversueh, haben sich als besonders wertvoll für den klinischen Nachweis derselben erwiesen, worüber das Genauere bei Landolt(4), S. 697) zu finden ist. Über die Möglichkeit eines gewissen, sehr unbestimmten unokularen Tiefeneindrueks beim Fallversuch vergl. man R. Müller[222]). Zur Ausführung des Stäbchenversuehs hat Pfalz[224]) einen eigenen Apparat (Stereoskoptometer) angegeben.

b) Wettstreit zwischen monokularem und binokularem Tiefeneindruck (Pseudoskopie).

Den Konflikt zwischen binokularer Tiefenwahrnehmung und monokularen Motiven der Tiefenvorstellung kann man in seinen mannigfachen Formen beobachten, wenn man beim Betraehten von Stereoskopbildern oder von plastischen Objekten dureh geeignete Mittel die Richtung der Querdisparation ins Gegenteil verkehrt, d. h. die gleichseitige in gekreuzte, die gekreuzte in gleichseitige Querdisparation umwandelt, und so den umgekehrten binokularen Tiefeneindruek hervorruft (Pseudoskopie).

Eine physikalisch-optische Ableitung und Definition dieser „chiastopischen Augenstellung“ — im Gegensatze zur „orthopischen“, welche den normalen Tiefeneindruck vermittelt, — hat M. v. Rohr[231, 232, 233]) gegeben. Die v. Rohrsche Darstellung und Bezeichnungsweise beruht darauf, daß man die Abbildung der Augen in den objektseitigen Strahlengang einträgt, und sie vereinfacht sehr die geometrische Konstruktion der Projektionsverhältnisse. Ich bin aber von derselben absichtlich abgegangen, weil es vom physiologischen Standpunkte aus, insbesondere mit Rücksicht auf die Frage nach dem Verhalten von Konvergenz und Akkommodation (siehe unten S. 175), übersichtlicher erscheint, umgekehrt die durch die optischen Instrumente dem Auge gelieferte Abbildung der Objekte zu konstruieren.

Bei der freiäugigen Betrachtung photographischer Stereoskopbilder richtet man bei aufrechter Kopf- und Bildstellung den Blick des rechten Auges auf das dem linken Auge zugehörige Halbbild, den des linken Auges auf das dem rechten Auge zugehörige Halbbild. Sind die Stereoskopbilder fest miteinander verbunden, so muß man zu diesem Zwecke die Gesichtslinien vor den Bildern kreuzen. Voneinander getrennte Halbbilder kann

man auch mit parallelen Gesichtslinien betrachten — und dann kann man auch ein Stereoskop benutzen — wenn man die den beiden Augen zugehörigen Halbbilder miteinander vertauscht. Sehr zu empfehlen ist es, die Stereoskopbilder umzukehren, so daß sie auf dem Kopfe stehen, wobei der pseudoskopische Effekt in vielen Fällen rascher und deutlicher zu sehen ist (Mach[217], S. 403). Dabei ist bei fest miteinander verbundenen Stereoskopbildern zu beachten, daß nunmehr das dem rechten Auge zugehörige Halbbild zwar vor dem linken Auge steht, daß man aber einen pseudoskopischen Effekt auch wieder dann erhält, wenn man die Blicklinien vor den Bildern kreuzt, so daß die Blicklinie des rechten Auges auf das vor dem linken Auge befindliche, dem rechten Auge zugehörige Halbbild, und dementsprechend die des linken Auges, auf das vor dem rechten Auge befindliche, aber dem linken Auge zugehörige Halbbild gerichtet ist. Einen überraschenden pseudoskopischen Effekt geben insbesondere Bilder mit isoliert vor Gebäuden stehenden Monumenten u. ä., welch letztere pseudoskopisch hinter der Gebäudefront erscheinen. Auf die einfachste Weise erhält man den pseudoskopischen Effekt bei der Rollmannschen „Farbenstereoskopie", wenn man das rote und blaue Glas vor den Augen vertauscht (den Zwicker verkehrt aufsetzt).

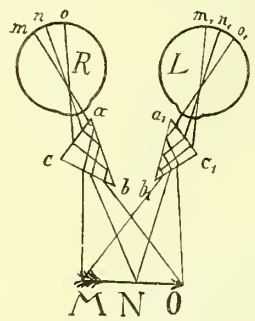


Fig. 30.
Aus Hermanns Lehrb. d. Physiol. 12. Aufl. S. 602.

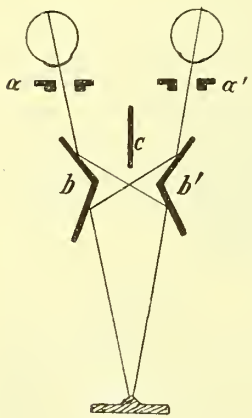


Fig. 31.
Ewald und Gross([182]), S. 526).

Die Querdisparation läßt sich auch bei direkter Betrachtung plastischer Objekte durch optische Hilfsmittel umkehren. Die dazu dienenden Apparate bezeichnet man als Pseudoskope. Den bisherigen Konstruktionen liegen folgende Prinzipien zugrunde:

1. Umkehrung des Bildes des Gegenstandes in jedem Auge durch einfache Spiegelung. Diese kann durch Totalreflexion der Strahlen an der Hypotenusenfläche eines rechtwinkligen Prismas erzeugt werden (Wheatstone, Dove; siehe M. von Rohr[233]), S. 61, 67, 69 u. 91). Die Abbildungsverhältnisse sind aus Figur 30 ohne weiteres ersichtlich.

2. Die Vertauschung der Bilder beider Augen durch doppelte Spiegelung geht offenbar auf Hardie zurück (siehe v. Rohr[232]), S. 413; [233]), S. 82). Ein derartiges Pseudoskop für kleine Objekte hat Ewald[182]) angegeben.

Das Prinzip des Apparates ist in Fig. 31 wiedergegeben. b und b′ sind je zwei unter stumpfen Winkeln gegeneinander geneigte Spiegel, a a′ Gucklöcher für beide Augen, c eine Scheidewand, welche die seitlichen Spiegelbilder für jedes Auge abblendet. Als Beobachtungsobjekte benutzt Ewald kleine dreiseitige Pyramiden aus Kork oder Schrotkugeln.

Für eine Beobachtung beliebiger Objekte der Umgebung eignet sich das Spiegelpseudoskop von Mach([217]) S. 404), das neuerdings Stratton[243])

— unabhängig von Mach — folgendermaßen eingerichtet hat. Der Apparat besteht aus einem Kasten mit 2 Gucklöchern für die beiden Augen, L und R in Fig. 32. Gegenüber den Gucklöchern ist der Kasten offen. Zwei vertikale Planspiegel M und N mit einander zugekehrten spiegelnden Flächen sind parallel zueinander so angebracht, daß N einen Winkel von 45° mit der geradeaus nach vorn gestellten Gesichtslinie des rechten Auges bildet. Jeder Spiegel ist nach rechts und links im Kasten verschieblich und außerdem um eine vertikale Achse drehbar. Die Anordnung der Spiegel, wie sie in der Figur angedeutet ist, gibt einen lebhaften pseudoskopischen Effekt. Macht man die Distanz R′ L′ gleich der Augendistanz R L, dann verschafft man sich eine pseudoskopische Parallaxe von normaler Größe. Man kann sie aber beliebig vergrößern, wenn man den Spiegel M parallel mit sich selbst

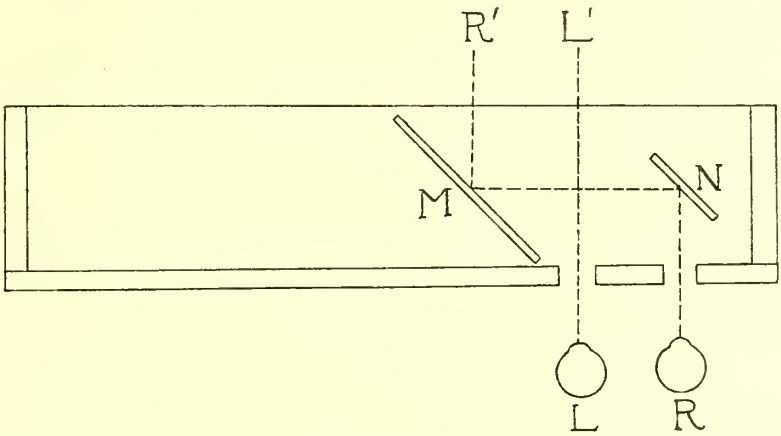


Fig. 32.
Nach Stratton[243]).

nach links verschiebt. Schiebt man außerdem den Spiegel N parallel mit sich selbst nach links, bis er vor L steht, so wandelt man das Instrument in ein Telestereoskop um.

3. Beim Linsenpseudoskop hat Wood[253]) eine schon von Wheatstone (siehe M. v. Rohr[233]), S. 67; [234]), S. 80) ausgesprochene Idee benutzt. In ein Prismenstereoskop der sogenannten amerikanischen Form werden auf dem Schlitten, der sonst die Stereoskopbilder trägt, in Augendistanz nebeneinander zwei Konvexlinsen kurzer Brennweite angebracht, und durch Verschiebung des Schlittens so weit vom Auge entfernt, daß man die von ihnen entworfenen verkehrten reellen Luftbildchen bequem betrachten kann. Eine ganz analoge Konstruktion: Vor jedem Auge je zwei Konvexgläser gleicher Brennweite, welche um ihre doppelte Brennweite voneinander abstehen, in einer Fassung, welche ganz der amerikanischen Form des Stereoskops entspricht — findet man bei Bourdon(2), S. 274ff.) Das Zustandekommen des pseudoskopischen Effekts wird hier dadurch begünstigt, daß die Gegenstände verkehrt (auf dem Kopf stehend) erscheinen.

c) Die binokulare Tiefenwahrnehmung beruht auf der Querdisparation der Netzhautbilder.

Der Beweis dafür kann erbraeht werden mit der eingangs S. 150 als Methode 1a bezeichneten Anordnung. Bei vertikaler Anordnung der Fäden bilden sich diese, wenn sie nicht im Horopter liegen, mit bloßer Querdisparation ab, es tritt binokulare Tiefenwahrnehmung auf.

Daß dagegen reine Längsdisparation keinen Einfluß auf die Tiefenwahrnehmung ausübt, zeigte Hering mit folgendem Versuch (R. S. 399): „Man spanne sehr feine Drähte von gleicher Stärke parallel über einen großen Rahmen so, daß nur drei in einer Ebene, die übrigen teils vor, teils hinter dieser Ebene liegen; einer der drei Drähte gehe durch den Mittelpunkt der Fläehe des Rahmens und habe in diesem Mittelpunkt eine Marke. Diesen Rahmen stelle man senkrecht zur Medianlinie so, daß die Fäden horizontal liegen. Läßt man nun jemanden, der die Anordnung der Drähte nicht kennt, fest die Marke des Mitteldrahtes fixieren aus etwa 1 m Entfernung durch eine kurze Röhre, welche beiden Augen den Rahmen ganz verdeckt, so ist derselbe nicht imstande, die Anordnung der Drähte zu erkennen und immer geneigt, sie sämtlich in einer Ebene zu sehen".

Dasselbe Resultat erhält man, wenn man statt der Fäden kleine Objekte verwendet, welche auf gleichmäßigem Grunde allein sichtbar sind. Hillebrand([197]), S. 26) befestigte auf drei geschwärzten Kokonfäden je ein kleines Papierschnitzelchen, das mit Leuchtfarbe bestrichen war. Das Schnitzelchen auf dem mittleren, in der Medianebene gelegenen Faden wurde fixiert. Die beiden seitlichen Schnitzelchen befanden sich in verschiedener Höhe. Als Hintergrund diente ein schwarzer Schirm, vor welchem bei geschlossenem Fensterladen, also sehr spärlicher Beleuchtung bloß die drei leuchtenden Fleekchen zu sehen waren. Der mittlere Faden wurde nun so lange nach der Tiefe verstellt, bis der mittlere helle Fleck in einer Frontalebene mit den beiden seitlichen zu liegen schien. Dabei bilden sich die letzteren in beiden Augen mit Längs-(Höhen-)disparation ab. Dies hat aber keinen Einfluß auf die Lokalisation, vorausgesetzt, daß nicht durch eine regelmäßige Anordnung solcher Leuchtpunkte eine perspektivische Auslegung des Bildes angeregt wird (vergl. darüber, sowie über die Auslegung haploskopisch vereinigter Schachbrettmuster mit längs disparaten Konturen Hillebrand l. c.). Weitere Versuehe bei Heine[190]), Weinhold[250a]) und Kothe[212]).

d) Grenze der binokularen Tiefenwahrnehmung (Tiefensehschärfe).

Zur Untersuchung kann die oben S. 150 unter 1b beschriebene Methode dienen (Heine[188])). Dieselbe Methode in der ursprünglichen Helmholtzschen Ausführung mit verschieblichen Nadeln benutzten Bourdon([171 und 2]), S. 249) und Pulfrich[227]). In der Bourdonschen Anordnung wurde die mittlere längs einer Skala mittels Schlittenführung verschiebliche Nadel in eine Ebene mit zwei feststehenden seitliehen eingestellt. Der Beobachter saß mit gestütztem Kopf in 2 m Entfernung und blickte durch einen horizontalen Spalt in einem schwarzen Schirm, welcher nur die mittleren Teile der Nadeln sichtbar ließ. In der von Pulfrich verwendeten Anordnung wurde ein runder (Holz- oder Glas-) Stab seitlieh von der Medianebene des Beobachters in verschie-

den weit vom Beobachter entfernte Löcher eines Tisches hineingesteckt. In der Mitte des Tisches befand sich ein schlittenartig gelagertes, verschiebliches Lineal, ebenfalls mit Löchern, in welche ein Stab hereingesteckt wurde. Die Einstellung des median auf dem Lineal befindlichen Stabes in gleiche scheinbare Entfernung mit dem seitlichen besorgte der Beobachter selbst durch Verschieben des Lineals mittels einer über Rollen geführten Schnur. Abdeckung der Enden der Stäbe, Auswechseln derselben gegen andere verschiedener Dicke, wie auch sonst üblich.

Hering[42]) benutzte von der Firma Zeiss nach Abbés Angaben hergestellte, in Glas eingeätzte Systeme paralleler Linien, deren gegenseitiger Abstand um Bruchteile eines Mm variierte, und welche durch freiäugiges Stereoskopieren vereinigt wurden. Nach dem gleichen Prinzip hat Pulfrich[227]) eine bei Zeiss erhältliche „Prüfungstafel für stereoskopisches Sehen“ entworfen. Bei diesen auf Papier gedruckten stereoskopisch zu vereinigenden Figuren und Liniensystemen sind allerdings infolge der Fehler bei der Zeichnung und Ausmessung der Vorlage kleine Abweichungen von den beigefügten Maßangaben vorhanden, welche eben an der Grenze des stereoskopisch Wahrnehmbaren stehen, und für Personen mit guter Tiefensehschärfe deutlich merkbar sind. Die Tafel ist daher in erster Linie zum Nachweis einer genügenden Tiefensehschärfe bei den Versuchspersonen und zur Übung bestimmt.

e) Vergleich der optischen Lokalisation nach der Tiefe mit der Anordnung der Dinge im wirklichen Raum.

Bei der nachfolgenden Beschreibung machen wir mit Vorteil Gebrauch von einer durch Hering eingeführten Terminologie. Nach dieser wird die Frontalebene, in welcher der Fixationspunkt zu liegen scheint, als die Kernfläche des Sehraums bezeichnet. Das in der Überschrift angegebene Problem gliedert sich dann in folgende Einzelfragen:

1. Welche Gegenstände werden in die Kernfläche lokalisiert?
2. Vergleich der Anordnung der Sehdinge relativ zur Kernfläche mit der Anordnung der wirklichen Dinge relativ zum Horopter.
3. Bestimmung des Abstandes der Kernfläche vom Beobachter.

1. Welche Gegenstände werden in die Kernfläche lokalisiert? Bestimmung des Längshoropters*).

Die speziellen Untersuchungsmethoden für diese Frage sind am ausführlichsten von Hillebrand und Tschermak ausgearbeitet worden. Hillebrand[197]) verwendete die eingangs unter 1 a angeführte Methode, unter Berücksichtigung der oben S. 150 ebenfalls schon mitgeteilten Vorsichtsmaßregeln, welche den Ausschluß aller monokular schon wirksamen Motive der Tiefenauslegung bezwecken. Das von Hillebrand gefundene Resultat zu erörtern, gehört nicht zu unserer Aufgabe.

*) Über die älteren Bestimmungen des Horopters (abgesehen von der Untersuchung der Netzhautkorrespondenz mittels der Substitutionsmethode) aus dem Einfachsehen kleiner Objekte siehe Hering (R. S. 429 ff.). Auch sei noch auf eine von Ladd-Franklin[215]) vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des Horopters hingewiesen, welche noch nicht vollständig ausgearbeitet ist, und deren Erörterung zuviel Raum beanspruchen würde.

Die Lokalisation in die Kernfläche ist nach Tschermak[245]) abhängig von der Zeit, während welcher die seitlich vom Fixationspunkt gelegenen Objekte dem Beobachter sichtbar sind. Zum Nachweis dieser Abhängigkeit bediente sich Tschermak folgender Einrichtung: Der Beobachter saß, „den Kopf an einen Stirnhalter gelehnt, an einem Tische in einem innen geschwärzten Kasten, dessen Vorderwand, — in etwa 10 cm Abstand vom Beobachter — durch einen rechteckigen Ausschnitt den Ausblick auf einen großen, weißen Schirm gestattete. Zwischen Kasten und Schirm war — durchweg für den Beobachter nicht sichtbar — an zwei seitlich auf der Tischplatte stehenden Trägern .... eine Querstange zum Tragen von Loten aus gleichem Material (schwarzer Zwirn, feinere oder gröbere Schnur bis zu 2 oder 3 mm Dicke) angebracht. Ein solches hing in der Medianebene des Beobachters, in passender Höhe .... mit einer kleinen Perle oder Scheibe als Fixationspunkt versehen. Die seitlichen Lote wurden von Reitern aus dickem Draht getragen, welche längs der Querstange zu verschieben waren, und konnten selbst an einem nach dem Beobachter vorspringenden Dorne der Reiter verlagert werden. Die Lote hatten Glyzerindämpfung, ihre Fußpunkte waren dem Beobachter nicht sichtbar. Dieselben wurden auf die mit weißem Papier bespannte Tischplatte projiziert, durch Verbindung der so gewonnenen Punkte ward eine Fußlinie als Charakteristikum des Lothoropters erhalten."

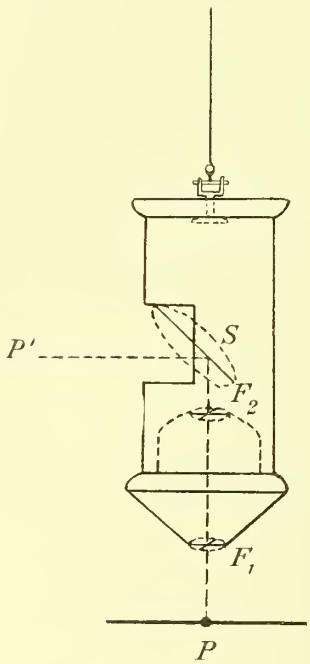


Fig. 33.
Nach v. Tschermak([101]), S. 33).

Zur Messung von Verschiebungen eines Lotes über einer eingeteilten Grundfläche und zu genauer Einstellung eines Lotes über einen bestimmten Punkt hat von Tschermak[101]) später in Visierlot*) angegeben. Der angegebene Zweck „wird erreicht durch Spiegelung der Grundfläche und Visieren auf dieselbe über zwei Fadenkreuze hinweg (in der Richtung P' in Figur 33). Zur Spannung des Lotfadens dient eine schwere zylindrische Hülse von 32 mm Länge und 16 mm Durchmesser, welche einen seitlichen Ausschnitt trägt, der den Blick auf einen kleinen, unter 45° gestellten Spiegel (S in Figur 33) gestattet. Die Hülse trägt unten eingeschraubt ein konisches Ansatzstück, welches mit einer Öffnung von 4 mm Durchmesser endigt. Diese ist durch ein Deckgläschen dicht geschlossen und wird von einem Fadenkreuze F_1 durchsetzt. Im Konus befindet sich 17 mm darüber ein zweites Fadenkreuz F_2, dessen Kreuzungspunkt ebenso wie der des ersten genau in der Richtung des Lotfadens gelegen ist."

Es wurde nun zunächst bei Fixation des 44 cm vom äußeren Augenwinkel des Beobachters entfernten Mittelfadens der „Dauerhoropter" bei länger dauernder Exposition der Seitenfäden bestimmt. Sodann wurden zwischen den Loten Kugeln fallen gelassen (wie beim Heringschen Fallversuch) und jene Fallbahnen bestimmt, welche in gleicher Frontalebene mit den Loten

*) Erhältlich bei Polikeit (Halle).

zu liegen schienen. Ferner wurde bei sehr kurzer Exposition der seitlichen Lote jene Stellung bestimmt, bei welcher sie in der Kernfläche erschienen. Die kurze Exposition wurde durch momentanes Auf- und Zuklappen zweier seitlicher Flügel in der Vorderwand des Kastens oder durch Momentanbelichtung bewirkt. Um aus den verschiedenen, so erhaltenen Kurven jene zu ermitteln, welche dem wirklichen Längshoropter entspricht, wurden dann in einer besonderen Versuchsreihe jene Orte aufgesucht, an welchen bei strenger Fixation des Mittellots die Tiefenunterschiedsempfindlichkeit der betreffenden exzentrischen Netzhautstellen am größten ist. Diese Orte entsprechen dem Dauerhoropter.

2. Vergleich der Anordnung der Schdinge relativ zur Kernfläche mit der Anordnung der Objekte relativ zum Horopter.

Die Frage, in welcher Weise die scheinbare Tiefe unter verschiedenen Umständen von dem Betrage der Querdisparation abhängt, ist bisher nur nach gewissen Richtungen hin untersucht worden. Es handelte sich bei diesen Untersuchungen zunächst um einen von Heine[187]) ausgeführten Vergleich zwischen scheinbarer Breitenausdehnung und scheinbarer Tiefe bei verschiedener scheinbarer Entfernung der Kernfläche. Nachdem dann Tschermak und Hoefer[246]) gezeigt hatten, daß die Tiefenwahrnehmung auch dann noch eine ziemlich genaue ist, wenn die Objekte schon in Doppelbildern erscheinen, haben R. A. Pfeiffer[225]) und A. Aal[163]) spezielle Vergleiche der scheinbaren Tiefe bei verschiedenem Abstand des binokularen Fixationspunkts ausgeführt unter Bedingungen, bei welchen die entfernteren bezw. näheren Gegenstände in Doppelbildern erschienen, Issel[204]) auch ohne diese Einschränkung. Wir besprechen im folgenden zunächst die reinen Tiefenuntersuchungen und schließen erst in einem folgenden Abschnitte den Vergleich an zwischen scheinbarer Größe (nach Breite und Höhe) und scheinbarer Tiefe.

Die Messungen über die Genauigkeit, mit welcher Objekte, die in Doppelbildern gesehen werden, dem Tiefenabstande nach lokalisiert werden*), führten Tschermak und Hoefer mittels folgender Anordnung aus: Der Beobachter blickte mit fixiertem Kopfe durch eine schwarze Röhre, welche am distalen Ende ein rechteckiges Fenster besaß, auf mattschwarze Stricknadeln, deren oberes und unteres Ende verdeckt blieb. Die Nadeln waren zum Teil senkrecht in Bleifüßchen eingelassen, welche auf Mm.-Papier standen. Eine Nadel war frei aufgehängt und längs eines Mm.-Stabes nach vorn und hinten verschieblich. Als Fixationspunkt diente ein kleines schwarzes Scheibchen auf weißem Grunde in 2 m Distanz vom Beobachter. Es wurde nun bei anhaltender Fixation des Scheibchens zunächst eine Nadel a median oder seitlich ins Gesichtsfeld gebracht und dauernd darin belassen. Durch Ver-

*) Daß überhaupt Doppelbilder in einem bestimmten Tiefenabstand von der Kernfläche erscheinen, war aus mehrfachen Untersuchungen bekannt, und bildete eine der Grundlagen der Heringschen Theorie der Tiefenwahrnehmung (Literatur bei Hering, R. S. 427 ff.; Hoefer[119]), S. 484, Anm.). Neuerdings hat Heine[192]) gezeigt, daß sogar noch ein gewisser Zwang besteht, verschiedenfarbige Doppelbilder sehr ähnlicher Form „auf ein äußeres Objekt zu beziehen“. Über Tiefensehen auf Grund von höhendistanten Doppelbildern siehe v. d. Meulen und v. Dooremaal[219b]).

schieben einer zweiten Nadel, welche immer nur kurze Zeit sichtbar gemacht wurde, wurde die Genauigkeit untersucht, mit welcher sie in die Frontalebene der Nadel a eingestellt wurde. Dieselben Versuche mit entsprechend geänderter Anordnung wurden auch bei Momentanbeleuchtung (mittels elektrischen Funkens) angestellt.

Bei den Untersuchungen R. A. Pfeiffers über die Lokalisation von Objekten, welche in Doppelbildern erscheinen, handelt es sich zunächst um folgenden Hauptversuch, der sich am einfachsten an der Hand der von Pfeiffer benutzten, nach dem Schema der Figur 34 gebauten Anordnung beschreiben läßt. d ist ein Spalt, durch welchen der Beobachter auf den Planspiegel Sp blickt. Dieser ist in einem vertikalen Geleise leicht beweglich und kann durch einen Fadenzug aus dem Gesichtsfelde entfernt werden. hh und h′h′ stellen je einen gleichmäßigen Hintergrund dar. Befindet sich der Spiegel Sp im Gesichtsfelde, wie es in der Figur dargestellt ist, so erblickt der Beobachter in ihm das Spiegelbild der Punkte F′ und O′ und sieht, während er O′ fixiert, F′ in Doppelbildern. Hat er sich die scheinbare Entfernung von O′ gut eingeprägt, so verlegt er die Fixationsabsicht rasch nach F′. Zu gleicher Zeit aber schnellt er durch einen Ruck den Spiegel Sp aus dem Gesichtsfelde empor, wodurch die Spiegelbilder von F′ und O′ verschwinden und F und O im Gesichtsfelde erscheinen. Im gleichen Moment also, in welchem der Beobachter F′ zu fixieren glaubt, fixiert er in Wirklichkeit F und O erscheint ihm doppelt. O ist verschieblich und seine Entfernung von F wird so lange geändert, bis F′O′ und FO dem Beobachter unter den oben angegebenen Fixationsbedingungen gleich erscheinen. Natürlich kann man ganz ebenso die Beobachtungsstrecke wechseln, während der Beobachter von der Fixation des Punktes F′ zu der des Punktes O′ übergeht.

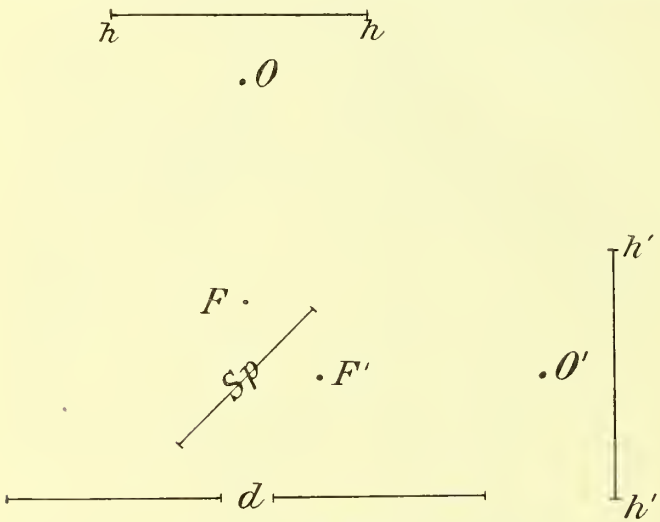


Fig. 34.
Nach Pfeiffer[225]).

Als Beobachtungsobjekte (F, O, F′, O′) verwendete Pfeiffer Punkte auf dünnen Salinglasplatten, welche in Rahmen auf einer optischen Bank beliebig verschoben werden konnten. Der Spiegel befand sich in der Diagonalebene eines innen geschwärzten würfelartigen Kastens, der an drei Seiten Öffnungen (für die Augen des Beobachters; für die Strecken FO und F′O′) besaß. Der Würfel und die Rahmen für die Glasplatten waren, um Seitenlicht aus-

zuschließen, durch lange ausziehbare Lederbalgen miteinander verbunden und das durchfallende Licht wurde von zwei großen, braun angestrichenen Leinwandschirmen, die als Hintergrund (h h und h′ h′) verwendet wurden, geliefert.

Pfeiffers Versuchsresultate, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, lassen sich qualitativ durch einfache von ihm angegebene Beobachtungen demonstrieren, von denen ich zwei herausgreife: „Man setze sich auf einen Stuhl und strecke die Beine so weit nach vorn, daß die Füße bequem gesehen werden können. Nahe vor das Gesicht halte man dann ein Fixationsobjekt, während die Aufmerksamkeit gleichzeitig auf die Füße gerichtet ist: die Beine erscheinen um vieles verlängert; man schätzt ihre Länge auf mehrere Meter."

Auf einem Tische werden drei sehr dünne Stricknadeln auf Korkfüßchen in gleichen Abständen voneinander (etwa 40—50 cm) so zur Aufstellung gebracht, daß sie für den Beobachter hintereinander in der Medianebene stehen. Jede Nadel trägt an ihrer Spitze ein schwarzes Kartonscheibchen (1,0—1,5 cm Durchmesser), dessen breite Fläche dem Beobachter zugekehrt ist. Fixiert man den mittleren Punkt (F), so zerfällt der vordere (A) in gekreuzte, der hintere (B) in gleichnamige Doppelbilder. Vergleicht man jetzt die beiden Doppelbilderpaare miteinander hinsichtlich ihres Abstandes vom Fixationspunkt, so ergibt sich, daß die Doppelbilder von A sehr viel näher an F zu stehen scheinen als die Doppelbilder von B.

Im Anschluß an die zweite eben zitierte Beobachtung benutzte Pfeiffer seine Anordnung auch dazu, um bei Fixation eines von drei in einer Linie hintereinander liegenden Punkten a, b, c die Strecken ab und bc miteinander zu vergleichen, wenn infolge Fixation des einen Punktes die beiden anderen in Doppelbildern gesehen wurden.

Speziell mit dieser Aufgabe beschäftigte sich dann eingehend A. Aal, welcher folgende Versuchsanordnung benutzte: In der Medianebene des Beobachters, dessen Kopf, durch ein Beißbrettchen fixiert, in einer Abblendungsröhre steckt, sind vor einer großen weißen Kartonfläche drei vertikale Stäbe 1, 2, 3 (1 rot, 2 schwarz, 3 blau gestrichen) mittels Schlitten an zwei parallelen längsverlaufenden Stangen aufgehängt. Einer dieser Stäbe trägt als Fixationszeichen eine glänzende Perle 4. Über den Tragstangen befindet sich eine Mm-Teilung. Der Beobachter hat nun während dauernder Fixation der Perle 4 entweder durch Verschieben von 3 die Strecke 2 3 auf scheinbare Gleichheit mit der gegebenen Strecke 1 2 einzustellen, oder bei Fixation von 3 die Strecke 1 3 durch Verschieben von 2 in die Hälfte zu teilen usf. Die Verschiebung wird vom Beobachter selbst durch Drehen einer Schraube bewirkt, welche durch Vermittlung einer Schnur ohne Ende einen beliebigen Schlitten mit dem an ihm hängenden Stabe nach vorne und hinten verstellt

In den bisherigen Versuchen wurde, wie bemerkt, die Tiefendistanz von Objekten verglichen, welche in Doppelbildern erschienen, und es ist fraglich, ob nicht dabei die reine Lateraldistanz der Doppelbilder auf die Einstellungen mit Einfluß nahm. Frei von diesem Bedenken sind die Versuche von Issel[204]), bei welchen (wenigstens in der Mehrzahl derselben) die Objekte nicht in Doppelbilder zerfielen. Issel benutzte zwei Versuchsanordnungen: In der ersten, von der Fig. 35 den Grundriß zeigt, wurden auf einem langen Tische durch je zwei vertikale Eisenstäbchen bei P und D je eine senkrecht zur Medianebene des Beobachters B liegende Vertikalebene markiert. Die Stäbchen bei P ragten von unten her bis in die Mitte des durch ein Abblendungsrohr verengten Gesichtsfeldes des Beobachters hinein, die

Stäbchen bei D von oben her ebenfalls bis zur Mitte des Gesichtsfeldes. Innerhalb der durch P und D begrenzten Strecke verlief median durch die ganze Höhe des Gesichtsfeldes ein Stäbchen M, welches der Beobachter so

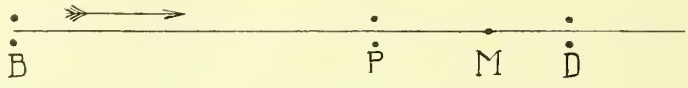


Fig. 35.
Nach Issel.

einzustellen hatte, daß es die Strecke P D scheinbar halbierte. Zu diesem Behufe war es mit einem auf einer Rollbahn gleitenden Wagen verbunden, der vom Beobachter mit einer Schnurübertragung vor- und rückwärts gezogen werden konnte.

In der zweiten Versuchsanordnung, Grundriß in Fig. 36, sah der Beobachter B vor sich 6 Eisenstäbchen, welche die Kanten zweier in der Medianebene hintereinander liegender Prismen P_1 D_1 und P_2 D_2 markierten.

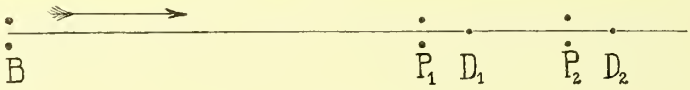


Fig. 36.
Nach Issel.

Die Stäbe bei P_1 D_1 ragten von unten, die bei P_2 von oben her bis in die Mitte des Gesichtsfeldes hinein. D_2 war das in der ersten Anordnung erwähnte, auf einem Rollwagen verschiebliche Stäbchen, dessen untere Hälfte durch einen weißen Schirm verdeckt war, so daß es nur von oben her ins Gesichtfeld herein zu ragen schien. Der Beobachter hatte die Aufgabe: 1. D_2 in einen Abstand von P_2 zu bringen, welcher gleich erschien der Distanz zwischen D_1 und P_1, 2. die gegen den Beobachter zu offenen Winkel der Prismen bei D_1 und D_2 scheinbar gleich einzustellen. Die Einstellung war in beiden Fällen verschieden.

3. Bestimmung des Abstands der Kernfläche vom Beobachter.

Zur Bestimmung des scheinbaren Abstandes des binokularen Fixationspunktes vom Beobachter stehen uns nur zwei höchst unvollkommene Hilfsmittel zu Gebote (vergl. Hering, R. S. 414ff; Helmholtz, O., S. 795ff; siehe ferner die einleitenden Bemerkungen oben S. 115):

1. Die Schätzung des Abstandes entweder rein aus der Erinnerung oder durch Vergleich mit einem in der Hand gehaltenen Maßstabe. Des letzteren Verfahrens bediente sich Wundt[254]) zur Bestimmung der scheinbaren Entfernung eines isoliert vor einem gleichmäßigen Hintergrunde sichtbaren vertikalen Fadens. Die Genauigkeit solcher Schätzungen wird natürlich wesentlich durch die Erfahrung und Übung der Versuchsperson bestimmt.

2. Die Angabe des scheinbaren Ortes des binokularen Fixationspunktes mit dem (nicht sichtbaren) Finger. Ein solcher (natürlich nur innerhalb der Reichweite des Arms ausführbarer) Vergleich wurde von Donders[176]),

S. 17 und Beilage A, S. 55) in folgender Weise angestellt: Der Beobachter betraehtet im Dunkelraum mit fixiertem Kopf einen dureh rasch aufeinander folgende Induktionsfunken erzeugten Lichtpunkt, dessen Abstand vom Auge und dessen Lichtstärke variabel ist. Letztere bleibt aber stets so gering, daß keine sonstigen Dinge zu sehen sind. „Nach ein paar Sekunden langer Fixierung hat der Beobachter mit seinem, mit Kautschuk bekleideten Zeigefinger der reehten Hand den Funken zu treffen. Unmittelbar nach der Bewegung wird das Tageslicht hereingelassen und der Abstand des Lichtpunktes und der Fingerspitze vom Auge in Mm abgelesen".

Dasselbe Prinzip läßt sich auch im Hellraum verwenden, wenn man die zustoßende Hand ganz abdeckt, z. B. in folgender Weise: Man bringt rechts unmittelbar neben dem Kopf einen sagittal gestellten Sehirm an, etwa ein auf der abgewandten Seite mit Papier überspanntes Reißbrett, so daß der reehte Arm hinter demselben ganz verdeckt ist. Nun betrachte man mit fixiertem Kopf ein in abgemessener Entfernung vor dem Beobachter befindliches Objekt (vor gleiehmäßigem Hintergrund durch eine kurze Pappröhre) und gebe mit einem Bleistift auf der Rückseite des Schirms die Stelle an, in welcher man die Frontalebene des Objekts zu treffen glaubt.

Helmholtz (O. S. 796) hielt dicht vor das Gesicht in die Medianebene ein Blatt steifen Papieres und blickte nach einem dahinter median herabhängenden Faden. „Das Papier verdeckte dem rechten Auge alles, was sich links in einigem Abstande von dem Faden befand, dem linken Auge, was sich rechts vom Faden befand." Näherte er nun von der rechten Seite her dem Faden einen Bleistift, so sah er diesen nur mit dem rechten Auge. Er versuchte dann mit dem Bleistift den Faden zu treffen, indem er ihn schnell vorschob. In dieser Anordnung wird die Lokalisierung der Hand unterstützt durch die allerdings sehr unbestimmte einäugige optische.

Donders[176]) hat ferner auch Versuche darüber angestellt, mit welcher Genauigkeit er unmittelbar nach Augenschluß mit dem Finger den Abstand eines vorher fixierten Punktes anzugeben vermochte. Solehe Versuche lassen sich natürlieh ohne weiteres im Hellzimmer anstellen.

f) Die Beziehungen zwischen scheinbarer Größe und Entfernung der Objekte.

Die „seheinbare Größe" der Sehdinge (gleich der „Sehgröße" nach Hering, vergl. Hillebrand[200])) hängt bekanntlich nicht bloß von der Größe der Netzhautbilder, sondern auch von der Entfernung ab, in welche die Sehdinge verlegt werden. Ein intensives Nachbild erscheint um so größer, je ferner es scheinbar liegt, um so kleiner, je näher es lokalisiert wird. Die Vergrößerung beim Blick in die Ferne, die Verkleinerung beim Blick in die Nähe erstreekt sieh auf alle im Sehfelde befindliehen Dinge zugleich. Beobachtet man mit einem Auge abwechselnd einen Bleistift, den man dicht vor das Auge hält und ein weit entferntes Fenster (Ludwig, Lehrb. d. Physiol. Bd. I, S. 252), oder nähert und entfernt man die Hand unter steter Fixation derselben, während man nebenher einen entfernteren Gegenstand mit beachtet (Hering[3]), S. 14ff.), so schrumpft der fernere Gegenstand um so mehr zusammen, je näher der Fixationspunkt an das Auge heranrückt.

Bestimmungen des Gesichtswinkels, unter welchem in verschiedener Entfernung vom Beobachter befindliche Streeken gleieh groß gesehen werden,

sind von Götz Martius[218]) in folgender Weise ausgeführt worden: Vor einem gleichmäßigen Hintergrunde (aus braunem Tuch) wurde dem Beobachter in 50 cm Entfernung ein an einem schwarzen Faden aufgehängter Stab als Normallänge dargeboten. Die Mitte des Stabes lag ungefähr in der primären Blickebene. Seitlich davon und in gleicher Höhe wurden dann in größerem Abstand vom Beobachter nacheinander Vergleichsstäbe von verschiedener Länge in ganz analoger Weise (an einem Faden aufgehängt vor einem braunen Hintergrunde) sichtbar gemacht und der Beobachter hatte anzugeben, welcher Stab ihm länger erschien. Ganz ähnlich verfuhr Holtz[201]). Er stellte in verschiedenem Abstande vom Auge zwei runde Kartonscheiben auf und variierte die Größe der ferner gestellten so lange, bis beide gleich groß erschienen. Auf möglichste Gleichmäßigkeit des Hintergrundes, Einstellung der Scheiben in Augenhöhe (wegen des Einflusses der Lage der Blickebene auf die Größenschätzung, siehe oben S. 130ff.) wurde geachtet.

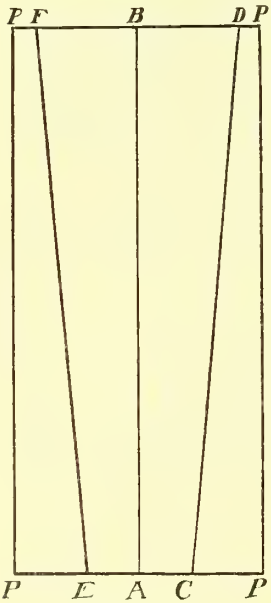


Fig. 37.
Nach Hillebrand[200]).

Um nun über bloße qualitative Ermittelungen hinaus das Gesetz festzustellen, nach welchem sich der Gesichtswinkel mit der Entfernung des Gegenstandes ändern muß, damit die scheinbare Größe konstant bleibt, bediente sich Hillebrand[200]) folgender Anordnung: Der Beobachter sitzt an der Schmalseite eines 4 m langen, 1 m breiten Tisches — P P P P in Figur 37 —, dessen Platte mit weißem Zeichenpapier bespannt ist. Er blickt durch einen gegen die Tischplatte etwas geneigten leeren (d. h. von Prismen usf. befreiten) Stereoskopkasten, dessen distale Öffnung durch einen Karton verschlossen ist. Ein Fenster im Karton gestattet freien Ausblick bis zum entfernten Ende der Tischplatte. Über diese sind 3 schwarze Fäden A B, C D, E F gespannt. Der mittlere unverschiebliche A B halbiert längs die Tischplatte und liegt in der Medianebene des Beobachters. Die beiden Seitenfäden sind mit ihren Enden D und F an der fernen Schmalkante des Tisches so befestigt, daß B D gleich B F ist. Die anderen, mit Gewichten belasteten Enden C und E der Seitenfäden an der nahen Schmalkante des Tisches hält der Beobachter mit je einer Hand fest und kann so die Seitenfäden in beliebige Konvergenz oder Divergenz bringen. Der Versuch wird so ausgeführt, daß der Beobachter durch das Fenster im Stereoskopkasten entweder nach dem fernen Ende B des Mittelfadens blickt und dieses fixiert oder den Blick längs des Mittelfadens hin und herschweifen läßt und nun mit den Händen die Seitenfäden in eine solche Stellung bringt, daß sie ihm miteinander und mit dem Mittelfaden parallel zu laufen scheinen.

Da sich bei diesen Versuchen ergab, daß die Seitenfäden nicht ganz gerade, sondern gegen die Medianebene zu etwas konvex erschienen, da ferner beim Hin- und Herschweifen des Blicks die Neigung der Blickebene etwas variierte, wurde die Versuchsanordnung dann so modifiziert, daß durch

zwei Reihen vertikal gespannter Fäden gewissermaßen eine Baumallee nachgeahmt wurde. Der Beobachter hatte die Aufgabe allen Fadenpaaren der „Allee" scheinbar gleichen Abstand voneinander zu geben, so daß also die beiden Fadenreihen in zwei zur Medianebene parallelen Ebenen zu liegen scheinen. Im einzelnen war die Versuchsanordnung folgende: 70 cm über der beschriebenen Tischplatte laufen zwei starke 4 m lange Holzplatten parallel den Längskanten der Tischplatte. Die Latten tragen in regelmäßigen Abständen von je 40 cm Ösen; durch je zwei einander gegenüberliegende Ösen ist ein Glasstab gesteckt, der also parallel mit der Schmalseite des Tisches verläuft. An jedem Glasstabe sind mittels loser Schlingen zwei schwarze, mit Gewichten, welche in eine Glyzerindämpfung eintauchen, belastete Fäden aufgehängt. Vor dem Beobachter steht ein schwarzer Schirm mit einem rechteckigen Fenster in Augenhöhe, durch welches bloß die Mittelpartien der Fäden sichtbar sind. Als Hintergrund dient ein gut beleuchteter weißer Schirm.

Ein Vergleich zwischen Breiten- und Tiefenschätzung bei verschiedener Entfernung des Beobachtungsobjektes wurde von Heine[187]) mittels der oben S. 150 unter 1 b beschriebenen Versuchsanordnung ausgeführt. Die drei Metallstäbe wurden so eingestellt, daß sie die Kanten eines vertikalen dreiseitigen Prismas markierten, dessen eine Kante median lag und dem Beobachter zugekehrt war, während die beiden anderen, symmetrisch zur Medianebene liegend, die Hinterfläche des Prismas begrenzten. Der Abstand des Mittelstabes von der so markierten Hinterfläche wurde so lange variiert, bis dem Beobachter (der während der Verschiebung die Augen geschlossen hielt) das Prisma gleichseitig erschien. Die Versuche wurden entweder im hellen Zimmer ausgeführt, so daß die Versuchsperson über die Entfernung des Prismas völlig unterrichtet war, oder auch unter Benutzung einer Doppelzimmeranordnung im Dunkeln. In letzterem Falle wurden besondere Vorsichtsmaßregeln getroffen, um nicht durch Nebenumstände zu verraten, in welche Entfernung der Apparat gebracht wurde.

Eine zweite Methode, die scheinbare Tiefen- und Breitenausdehnung bei verschiedener scheinbarer Entfernung des Gegenstandes zu vergleichen, besteht in der Betrachtung von stereoskopischen Halbbildern bei wechselnder Konvergenz. Heine (l. c.) steckte in ein Heringsches Haploskop 2 Tafeln mit je 3 vertikalen parallelen Linien, welche einen derartigen Abstand voneinander hatten, daß sie bei binokularer Vereinigung den Eindruck eines Prismas ergaben, dessen eine Kante dem Beobachter zugewendet war, und variierte nun durch Drehung der Haploskoparme die Konvergenz. Wird bei diesen letzteren Versuchen nicht gleichzeitig der Abstand der Objekte vom Auge entsprechend geändert (bei stärkerer Konvergenz die Objekte dem Auge genähert, bei schwächerer vom Auge entfernt), so erfolgt dabei auch eine Lösung der Assoziation zwischen Konvergenz und Akkommodation (vergl. dazu unten S. 174).

Je stärker der Impuls zum Nahesehen ist, desto beträchtlicher wird die scheinbare Verkleinerung der Gegenstände. Sie wird daher ungewöhnlich hochgradig, es tritt sogen. Mikropie auf, wenn durch bestimmte Umstände eine abnorm verstärkte Innervation zum Nahesehen erfordert wird. Dies ist z. B. der Fall beim Vorsetzen von Konkavgläsern vor ein Auge, bei einer durch Einträufelung von Giften (Atropin, Homatropin) in den Bindehautsack erzeugten Parese der Akkommodation usf.

Beobachtet man in diesen Fällen bloß mit einem Auge und verdeckt das andere, so bleiben natürlich Akkommodations- und Konvergenzimpuls miteinander verknüpft, indem sich das verdeckte Auge in starke Konvergenzstellung begibt. Der Unterschied gegenüber dem Normalen besteht dann bloß in dem abnorm verstärkten Impuls zur Akkommodation plus Konvergenz. Die Bedingungen für das Auftreten der Mikropie sind zusammengestellt bei Koster[210]). Zur Theorie vergl. man Koster (l. c.), Sachs[238,239]), Isakowitz[203]) und Schwarz[241]).

An das vorige anschließend, aber gesondert zu besprechen sind die Fälle, in welchen bei binokularem Sehen eine Lösung der Assoziation von Konvergenz und Akkommodation herbeigeführt wird. Von den beiden hier vorliegenden Möglichkeiten ist die eine — der Änderung der Konvergenz bei gleichbleibender Akkommodation, hinsichtlich der gleichzeitigen Lokalisation der Netzhautbilder am häufigsten studiert worden. Sie läßt sich herbeiführen: Beim freiäugigen Stereoskopieren oder im Brewsterschen Stereoskop dadurch, daß die beiden stereoskopischen Halbbilder bei gleichem Abstand vom Auge einander genähert oder voneinander entfernt werden. Die Änderung der Stellung der Gesichtslinien bei diesem Versuche im Brewsterschen Stereoskope ergibt sich aus Figur 27 auf S. 158: wenn man a b c und a′ b′ c′ einander nähert, als Zunahme, wenn man a b c und a′ b′ c′ voneinander entfernt, als Abnahme der Konvergenz bei gleichbleibender Akkommodation. Im Wheatstoneschen Stereoskope erzielt man Annäherung der Spiegelbilder, $\alpha\beta\gamma$ und $\alpha'\beta'\gamma'$ in Figur 24 auf S. 152, durch Verschieben von a b c gegen A und von a′ b′ c′ gegen B hin. Die Minderung der Konvergenz kann man dabei bis zur absoluten Divergenz der Gesichtslinien treiben (vergl. speziell hierüber Becker und Rollett[168])). In diesem Falle variiert man zugleich auch den Winkel, unter welchem die auf korrespondierende Punkte gerichteten Gesichtslinien die Bildebene schneiden. Konstant bleibt dieser Winkel, wenn man die Mehrung oder Minderung der Konvergenz im Heringschen Haploskop durch Drehen der Haploskoparme herbeiführt, also nach Figur 26 auf S. 154 beim Übergang von Stellung a zu Stellung b, oder umgekehrt.

Statt mit Stereoskopbildern, wie in den bisherigen Versuchen, läßt sich eine Lösung der Assoziation von Konvergenz und Akkommodation auch bei Betrachtung von Gegenständen der Umgebung herbeiführen. Am längsten bekannt sind die sogenannten „Tapetenbilder“. Man richtet den Blick beider Augen gegen ein gleichmäßiges Geflecht (H. Meyer[220])) oder eine Tapete mit regelmäßig sich wiederholendem Muster (Helmholtz, O. S. 798ff., neuerdings Kahn[208])) derart, daß sich die Gesichtslinien entweder vor oder hinter der Ebene des Geflechtes oder der Tapete schneiden und gleichartige, aber nicht identische Partien des Musters auf korrespondierende Netzhautstellen fallen. Ganz dasselbe erhält man bei binokularer Vereinigung zweier auf gleichmäßigem Grunde nebeneinander liegender gleicher Objekte (Münzen, Briefmarken) mit vor oder hinter der Ebene des Grundes sich kreuzenden Gesichtslinien (Hering[3]), S. 32ff.; R. S. 431).

Ein weiteres Mittel zur Änderung der Konvergenz bei gleichbleibender Akkommodation ist das Vorhalten von Prismen vor die Augen mit nasal- oder temporalwärts gerichteter brechender Kante. Doch sind solche Versuche wegen der gleichzeitigen Bildverzerrung (vergl. Helmholtz O. S. 806; Grützner[184])) sehr unrein. Helmholtz (O. S. 805) hat zur Herbeiführung

seitlicher Bildverschiebungen eine Prismenkombination empfohlen, bei welcher die Bildverzerrung gering ist, aber für gewisse Versuche doch in Betracht kommt. (Vergl. dazu Hillebrand[197]) S. 45ff.)

Die Besprechung der Resultate und der Theorie dieser Versuche gehört nicht hierher. Man vergl. außer den oben zitierten Autoren noch Heine[187]) (siehe oben S. 173) und besonders Elschnig[181]).

Als Begleiterscheinung tritt eine gegenüber der Akkommodationsleistung verstärkte Konvergenzeinstellung auf bei allen telestereoskopischen Versuchen. Die Verhältnisse werden wohl am anschaulichsten dargestellt, wenn man nicht, wie üblich,

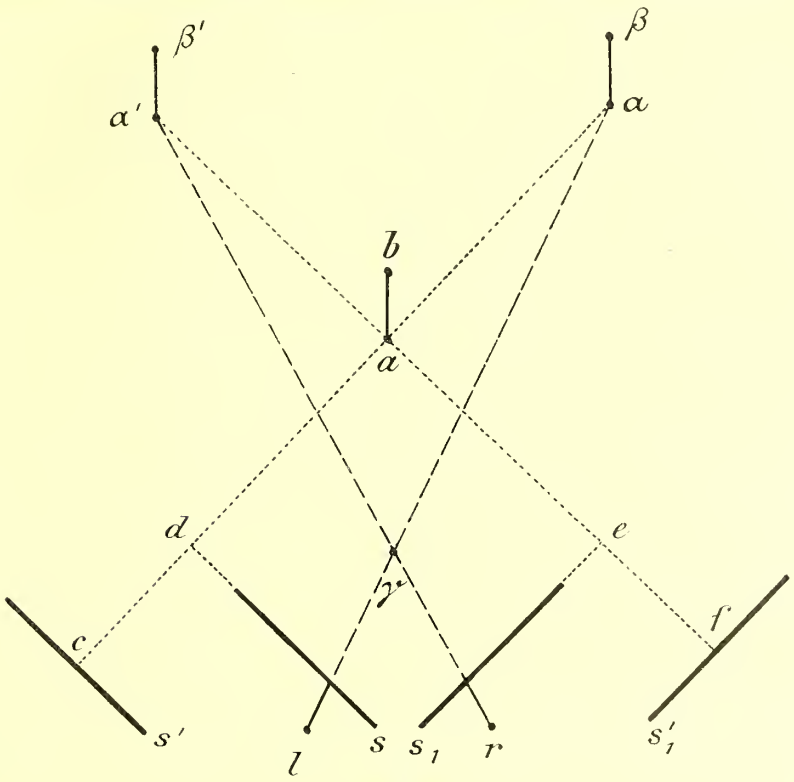


Fig. 38.

das Bild der Augen in den objektseitigen Strahlengang einzeichnet, sondern umgekehrt das den Augen durch die telestereoskopische Anordnung dargebotene Bild des Objektes konstruiert. Es seien in Figur 38 l und r die Drehpunkte beider Augen. Vor jedem Auge stehen zwei parallele, unter 45° gegen die sagittale Richtung geneigte Planspiegel (belegte Glasplatten oder die Hypotenusenflächen rechtwinkliger Prismen) s und s', bezw. s_1 und s_1', mit einander zugekehrten spiegelnden Flächen. Das von s s' ins linke Auge gespiegelte Bild eines nach der Tiefe sich erstreckenden Objekts a b liegt nach der Spiegelkonstruktion*) in $\alpha\,\beta$ (wobei $a\,\alpha = 2\,c\,d$), das von $s_1\,s_1'$ ins rechte Auge

*) a wird von s' in der Richtung der Normalen a d c und in der Entfernung a c jenseits s' abgebildet, und dieses Spiegelbild wird von s in die Entfernung $d\,\alpha = a\,c + c\,d$ hinter die Ebene s d zurückverlegt, woraus folgt $c\,\alpha = a\,c + 2\,c\,d$.

gespiegelte Bild desselben Objekts in $\alpha'\beta'$ ($a\alpha' = 2ef$). Beim Vorsetzen des Telestereoskops vor das den Gegenstand ab betrachtende unbewaffnete Auge erfolgt demnach eine Mehrung der Konvergenz (nach γ) und eine Minderung der Akkommodation.

Ändert man die Stellung der Spiegelflächen derart, wie es in Figur 39 angegeben ist, so daß von der Objektseite aus betrachtet die Augen einander genähert erscheinen — Hypostereoskop nach Grützner[184*]) — so ergibt die Konstruktion der Abbildung des Objektes a (in α und α', wobei $a\alpha = a\alpha'$ gleich der doppelten Spiegeldistanz bc) eine gegenüber der Akkommodationsleistung stark herabgesetzte Konvergenz der Gesichtslinien.

Ganz analoge Verhältnisse ergeben sich bei einem von Rollett[236]) angegebenen, neuerdings von Grützner[184]) studierten Versuche, in welchem man durch 2 im Winkel

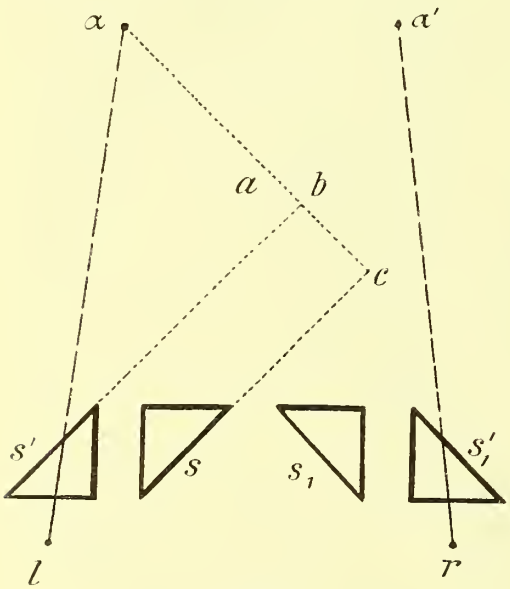


Fig. 39.

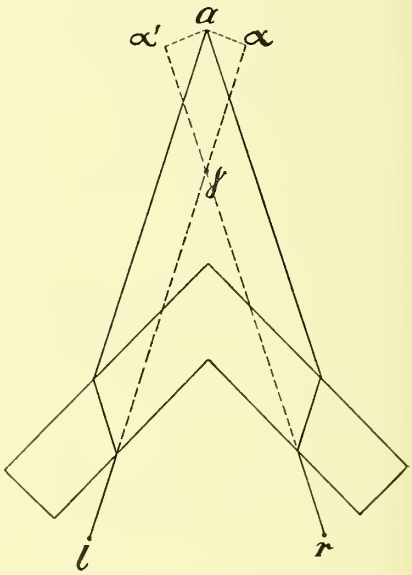


Fig. 40.

zueinander geneigte dicke planparallele Glasplatten (vergl. Figur 40) auf einen Gegenstand a hinsieht. Hält man die Glasplatten so, wie in der Figur, so wird durch die rechte Glasplatte das Objekt a in α', durch die linke in α abgebildet, und die Gesichtslinien konvergieren nach γ. Dreht man die Glasplatten so, daß man auf die Außenseite des Winkels blickt, so erscheint das Objekt für das linke Auge nach links, für das rechte nach rechts verschoben und es ergibt sich eine Minderung der Konvergenz bei gleicher Akkommodation.

Der zweite Fall, die Änderung der Akkommodation bei unveränderter Konvergenz läßt sich herbeiführen durch Vorsetzen von Konkav- (bezw. Konvex-)Gläsern vor beide Augen, wobei allerdings die dadurch erzeugte Verkleinerung (bezw. Vergrößerung) der Netzhautbilder zu berücksichtigen ist.

Von sonstigen Versuchsanordnungen, welche gestatten den Akkommodationsgrad bei unveränderter Stellung der Gesichtslinien und unverändertem

*) Über ältere ähnliche Konstruktionen (Wenham, Javals Ikonoskop, Hirschberg) siehe Grützner (l. c.) und M. v. Rohr[232]), S. 422; [233]), S. 83).

Gesichtswinkel zu variieren, führe ich folgende an: Van Albada[164]) entfernte an einem Doppelfernrohr (Operngucker) die Okulare und verlängerte die Tuben durch Pappröhren soweit, bis seine Augen, wenn er sie an die Enden der Röhren anlegte, sich gerade in den Brennpunkten der beiden Objektive befanden. Dann ließ er von einem Gehilfen ein Stereoskopbild (Glasdiapositiv), dessen Lateraldistanz nicht größer war als der Abstand der beiden Fernrohr-Tuben voneinander, vor den Operngucker halten und innerhalb der Brennweite der Objektive entfernen und nähern. Wie Figur 41 zeigt, sieht das im Brennpunkt der Linse befindliche Auge das virtuelle

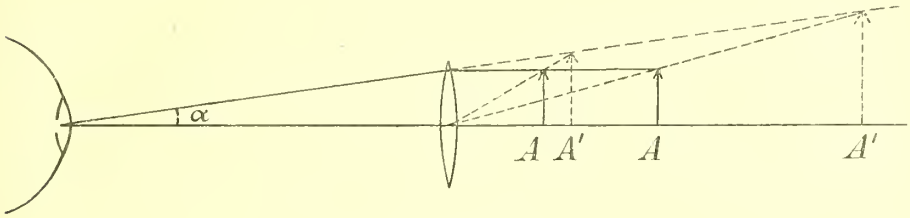


Fig. 41.
Nach van Albada[164]).

Bild A′ des Objekts A, wenn letzteres innerhalb der Brennweite verschoben wird, stets unter dem gleichen Winkel α. Bloß die Akkommodation ändert sich je nach der Entfernung von A′.

Eine weitere, ebenfalls schon von van Albada (l. c.) angeführte Anordnung besteht darin, daß man zwei identische Objekte durch freiäugiges Stereoskopieren mit vor ihnen gekreuzten Gesichtslinien binokular vereinigt und an den Kreuzungspunkt der Gesichtslinien ein drittes Objekt anbringt. Man kann nun bei fixiertem Kopf und unveränderter Konvergenz die Akkommodation bald auf das Sammelbild der fernen Objekte, bald auf das nahe Objekt einstellen. Ähnliche Anordnungen benutzten auch Weinhold[250b]), Carr und Allen[174]).

Anhang: Bemerkungen über das Stereoskopieren.

Während im vorhergehenden ausschließlich die Anwendung der stereoskopischen Methoden zur Untersuchung des Raumsinnes des Auges erörtert wurde, sollen hier anhangsweise kurz einige Gesichtspunkte besprochen werden, welche sich auf die Wiedergabe körperlicher Objekte durch Stereoskopbilder beziehen. Die übrigen technischen Anwendungen der Stereoskopie müssen als zu weit abliegend übergangen werden.

Die physikalisch-optischen Bedingungen für eine exakte Wiedergabe körperlicher Objekte durch Stereoskopbilder sind insbesondere von M. v. Rohr([229]; vergl. auch [233])) zusammengefaßt worden.

Berücksichtigen wir zunächst nur ein Auge, dessen Drehpunkt C in Figur 42 sei, und dessen Blick auf den Punkt o gerichtet sei. Diese eine bevorzugte etwa horizontale Blickrichtung C o heiße die Hauptblickrichtung. Denken wir uns nun im Fixationspunkte o eine zur Hauptblickrichtung C o senkrechte Ebene E E errichtet, welche von Rohr als Einstellungsebene

bezeichnet, so können wir uns vom Augendrehpunkt C aus*) alle Punkte eines Objektes nach der Richtung, in welcher sie beim direkten Sehen erscheinen, auf die Einstellungsebene projizieren. Wir erhalten so ein ebenes Abbild des Objektes für das direkte Sehen. Dieses Abbild des Objekts kann ersetzt werden durch eine entweder gleichgroße oder winkeltreu verkleinerte Abbildskopie. Eine solche läßt sich erzeugen mit Hilfe eines auf die Ebene E E scharf eingestellten, eng abgeblendeten photographischen Objektivs, das so stehen muß, daß seine Achse mit der Hauptblicklinie zusammenfällt und die Mitte seiner Eintrittspupille an der Stelle des Augendrehpunkts C liegt. Diese auf photographischem Wege hergestellte physische Abbildskopie hat man nun so vor das Auge zu bringen, daß die Neigungswinkel der von den verschiedenen Punkten der Abbildskopie ausgehenden Hauptstrahlen gleich sind den Winkeln (W in Figur 42), unter welchen die entsprechenden Punkte des Objekts beim sukzessiven direkten Sehen erschienen. Dazu ist nötig, daß die Abbildskopie wiederum zur Hauptblicklinie senkrecht steht, und daß ihr der richtige Abstand vom Auge gegeben wird. Ist die Abbildskopie ebenso groß wie das Abbild selbst, so muß natürlich ihr Abstand vom Augendrehpunkt gleich sein dem der Einstellungsebene vom Augendrehpunkt. Ist sie n fach verkleinert, so darf ihr Abstand vom Augendrehpunkt nur den n ten Teil des Abstandes der Einstellungsebene vom Augendrehpunkt betragen. Fernaufnahmen sind aus einem Abstand vom Augendrehpunkt zu betrachten, welcher gleich ist der Äquivalentbrennweite des Objektivs.

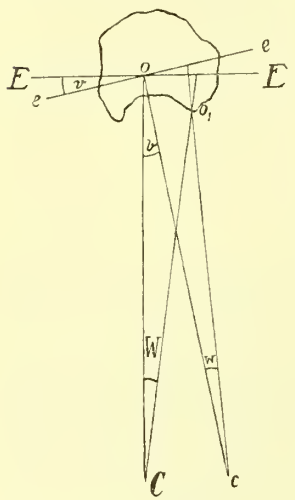


Fig. 42.
Nach v. Rohr[229], S. 282).

Gehen wir nun vom einäugigen zum zweiäugigen Sehen über, so können wir ein Raumobjekt durch zwei ebene Abbildskopien ersetzen, von denen jede den eben genannten Bedingungen beim einäugigen Sehen entsprechen muß, und welche außerdem eine ganz bestimmte Stellung gegeneinander haben. Es seien C und c in Figur 42 die Drehpunkte beider Augen, v sei der Konvergenzwinkel C o c, welcher gleich ist dem Winkel, den die beiden Einstellungsebenen E E und e e miteinander einschließen. W und w seien die Winkel, welchen die Blicklinien bei sukzessiver Fixation der Punkte o und o_1 miteinander bilden. Projizieren wir alle Punkte des betrachteten Objektes vom Drehpunkt C als Perspektivitätszentrum aus auf die Ebene E E und ebenso von c aus auf e e, so erhalten wir zwei Abbilder des Objekts. Zieht man von jedem Projektionszentrum aus je eine gerade Linie zu den homologen Punkten der beiden Abbilder des Objekts, so schneiden sich

*) Den Augendrehpunkt und nicht den Kreuzungspunkt der Visierlinien wählte v. Rohr als Perspektivitätszentrum deshalb, weil das gewöhnliche Sehen mit bewegtem Blick berücksichtigt werden sollte. Die ausführlichere Begründung dafür, auf deren Diskussion hier nicht näher eingegangen werden kann, siehe bei M. v. Rohr[235]).

diese Geraden in einem Punkte, der im hier gegebenen Falle natürlich mit dem abgebildeten Objektpunkt selbst zusammenfällt. Die Gesamtheit solcher Schnittpunkte beider von den Projektionszentren zu homologen Stellen zweier beliebig hergestellter Abbilder gezogenen Geraden bezeichnet M. v. Rohr als ein Raumbild, den abgebildeten Gegenstand als Raumobjekt. Ist, wie in unserem Falle das Raumbild dem Raumobjekt kongruent, so nennt er das Raumbild ein tautomorphes. Ist, wie in einem später zu besprechenden Falle das Raumbild dem Raumobjekt streng ähnlich, aber nach allen Richtungen gleichmäßig vergrößert oder verkleinert, so wird es als homöomorphes bezeichnet.

Für die Herstellung eines tautomorphen Raumbildes lassen sich nun aus dem Gesagten folgende Regeln ableiten: Wir verschaffen uns zunächst von dem Raumobjekt zwei physische Abbildskopien (in natürlicher Größe oder n-fach verkleinert), indem wir zwei gleiche photographische Objektive so anordnen, daß die Zentren ihrer Eintrittspupillen dieselbe Lateraldistanz voneinander haben, wie die Drehpunkte beider Augen, daß die Achsen beider auf den Punkt o gerichtet und beide auf ihn scharf eingestellt sind. Bei der Betrachtung der Abbildskopien ist dann nötig: erstens, daß sie unter demselben Winkel v gegeneinander geneigt sind, wie die Abbilder selbst. Dies erreicht man ideal mit Hilfe des Heringschen Haploskops, weil in diesem Apparat bei jedem beliebigen Konvergenzgrade die Hauptblicklinien auf der Ebene der Stereoskopbilder senkrecht stehen.*) Natürlich muß man dabei spiegelverkehrte Abbildskopien verwenden.

Die zweite Forderung ist die, daß man die Drehpunkte beider Augen in den richtigen, bei Verkleinerung entsprechend verringerten Abstand von den Abbildskopien bringt (vergleiche oben). Hat man Landschaftsbilder vor sich, welche mit parallelen Objektivachsen und Einstellung auf unendliche Ferne aufgenommen wurden, dann hat man demnach die Bilder mit parallel gestellten Hauptblicklinien zu betrachten und den Augenabstand gleich der Äquivalentbrennweite des Objektivs zu machen. Bei Objektiven von kurzer Brennweite kann nun für den Emmetropen die Akkommodationsanstrengung für das nahe Bild sehr unbequem werden. Es sind dann zweckmäßig die Abbildskopien in die vordere Brennebene eines optischen Systems zu bringen, dessen Brennweite mit der des Aufnahmeobjektivs übereinstimmt. Der weiteren von Gullstrand an ein solches System gestellten Forderung, daß es ein in seiner vorderen Brennebene liegendes Bild für einen etwa $2^1/_2$ cm hinter der letzten Linsenfläche gelegenen Blendenort verzeichnungsfrei im Unendlichen abbilde, so daß man den Drehpunkt des Auges an diese Stelle bringen kann, hat dann M. v. Rohr durch die Konstruktion der Verantlupe Genüge getan. Das mit diesen Lupen ausgestattete Zeisssche Verantstereoskop ist demnach der Idealapparat für die Betrachtung von solchen Fernaufnahmen mit parallel gestellten Objektivachsen.

Nehmen wir nun an, es werden beiden Augen den dargelegten physikalisch-optischen Bedingungen vollkommen entsprechende, tautomorphe Raumbilder

*) Mit entsprechender Modifikation ließe sich auch das sehr einfache „Winkelstereoskop mit Mittelspiegel" von Pigeon[226]) hierfür verwenden. Vergl. über diesen Apparat die Bemerkungen von M. v. Rohr in Zeitschr. f. Instrumentenk. 1907, S. 255.

mehrerer Objekte geboten, so fragt sich jetzt: Werden die Netzhautbilder auch wirklich so lokalisiert, daß die Anordnung der Sehdinge im Sehraum mit der Anordnung der durch die Abbilder ersetzten Raumobjekte übereinstimmen? Dies wäre nur dann der Fall, wenn die subjektive optische Lokalisation nach den Gesetzen der Zentralprojektion erfolgte, was aber nicht zutrifft.*) Ich will hier die mannigfachen Abweichungen der subjektiven Breiten- und Höhenlokalisation von der reinen Projektion, die schon beim einäugigen Sehen auftreten, und die Hauck im unten zitierten Buche vorwiegend berücksichtigt hat, ganz übergehen, überdies auch noch absehen von der Inkongruenz zwischen der Lage der Objekte im Horopter und der Lokalisierung ihrer Netzhautbilder in der Kernfläche, und mich bloß auf zwei der wichtigsten Punkte beschränken: die Tiefenlokalisation und die Abhängigkeit der scheinbaren Größe von der scheinbaren Entfernung.

Die binokulare Wahrnehmung von Tiefenunterschieden ist an die Querdisparation der Netzhautbilder gebunden. Der Betrag der Querdisparation einer bestimmten konstanten Tiefenstrecke nimmt aber mit zunehmender Entfernung der Strecke vom Beobachter rasch ab. Ist die Querdisparation unter ein gewisses Ausmaß (10—15″) gesunken, so fällt die binokulare Tiefenwahrnehmung überhaupt weg, und es bleiben nur noch die ganz unzureichenden monokularen Motive der Tiefenvorstellung übrig. Innerhalb des Bereichs der binokularen Tiefenwahrnehmung hängt aber die Tiefenlokalisation auch nicht etwa eindeutig von der Größe der Querdisparation ab, vielmehr geben, wie besonders die Versuche von Issel[204]) (vergl. ferner Pfeiffer und Aal) gezeigt haben, gleich große Querdisparationswinkel den Eindruck um so größerer Tiefenerstreckung, je weiter die Tiefenstrecke vom Beobachter entfernt ist, die Querdisparation wird mit zunehmender scheinbarer Entfernung der Kernfläche vom Beobachter „besser ausgenutzt“ (Heine[187])). Diese bessere Ausnutzung geht aber keineswegs soweit, daß etwa die Abnahme der Querdisparation bei zunehmender Entfernung des Objekts vom Beobachter dadurch ausgeglichen würde, sie ergibt gewissermaßen nur eine Korrektur der mit der Entfernung zunehmenden Inkongruenz zwischen der Größe der Querdisparation und der wirklichen Streckenlänge.

Bezüglich der scheinbaren Breiten- und Höhenausdehnung der Objekte der „scheinbaren Größe“, liegen ganz ähnliche Verhältnisse vor. Zwar hängt die scheinbare Größe nicht lediglich vom Gesichtswinkel ab, es entspricht also nicht etwa unabhängig von der Entfernung gleich großen Netzhautbildern gleiche scheinbare Größe, woraus sich ja eine ungeheure Inkongruenz zwischen optischer Lokalisation und Projektion ergeben würde. Vielmehr wird auch hier wieder der Gesichtswinkel bei wachsendem Objektabstand vom Beobachter „besser ausgenutzt“, ein Gegenstand erscheint bei gleichem Gesichtswinkel um so größer, je größer seine scheinbare Entfernung ist. Aber auch diese Korrektur geht, wie die tägliche Erfahrung lehrt, nicht soweit, daß die Abnahme des Gesichtswinkels bei Entfernung des Objekts dadurch ausgeglichen würde, vielmehr hat Hillebrand[200]) eine einfache Beziehung zwischen

*) Von Seite der deskriptiven Geometer wurde dies besonders scharf durch G. Hauck[186]) betont, auf dessen Buch mich Herr Kollege F. Hillebrand zuerst aufmerksam machte.

den Gesichtswinkeln und den Querdisparationen*) aufgedeckt: mehrere verschieden weit entfernte Gegenstände erscheinen dann gleich groß, wenn die Unterschiede ihrer Gesichtswinkel den Unterschieden der Querdisparationen proportional sind.

Dieses Resultat im Zusammenhalt mit den Versuchen von Issel ergibt aber wieder, daß die Ausnutzung der Querdisparation und der Gesichtswinkel bei verschiedener Entfernung der Objekte einander nicht parallel gehen. Direkt nachgewiesen hatte das vor Issel schon Heine[187]). Die Querdisparation wird im Vergleich mit den Gesichtswinkeln um so besser ausgenutzt, je weiter die Gegenstände entfernt erscheinen, und zwar in individuell verschiedener Weise. Es gibt ein bei verschiedenen Personen verschieden ausgedehntes und verschieden weit vom Auge entferntes Gebiet, innerhalb dessen die Gegenstände in denselben Größenverhältnissen gesehen werden, welche sie wirklich besitzen — der orthoskopische Bereich. Jenseit des orthoskopischen Bereichs erscheinen die Gegenstände im Vergleich zu ihrer Breitenausdehnung flacher, diesseit desselben tiefer, als ihren wirklichen Dimensionen entspricht. Das letztere würde sich zwar auch aus der verhältnismäßig stärkeren Abnahme der Querdisparation gegenüber dem Gesichtswinkel bei zunehmendem Objektabstand ergeben. Aber der Versuch zeigte, daß die Bedingung für die Orthoskopie nicht etwa darin besteht, daß das Verhältnis zwischen Querdisparation und Gesichtswinkel gleich bleibt, daß vielmehr bei gleichem Verhältnis zwischen beiden die scheinbare Tiefenerstreckung gegenüber der Breite um so größer wird, je weiter der Gegenstand vom Beobachter entfernt erscheint.

Bei dieser verwickelten Sachlage scheint nun der einfachste Fall der zu sein, daß man mit der Wiedergabe räumlicher Objekte durch Stereoskopbilder bloß denselben Eindruck erzielen will,**) den man bei der binokularen Betrachtung der Objekte selbst erhält, wobei man also alle Abweichungen der optischen Lokalisation von der reinen Projektion als in beiden Fällen gleich mit in Kauf nimmt. In diesem Falle sind zunächst die von M. v. Rohr aufgestellten Regeln einzuhalten, welche einen möglichst vollständigen Ersatz der räumlichen Objekte durch zwei ebene Abbildskopien bezwecken.***) So erhält man die Perspektive und die Querdisparation in richtiger Weise, und man hat nun außerdem noch darauf zu achten, daß man im Stereoskop auch die sogenannte absolute Entfernung möglichst ebenso einschätzt, d. h. also die Kernfläche in dieselbe Entfernung verlegt, wie beim Betrachten der Gegen-

*) Vergl. dazu die Bemerkungen von Kries (Z. f. Psychol. Bd. 33, S. 366).

**) Selbstverständlich bezieht sich dies bloß auf die Form der Objekte.

***) Einen ganz vollkommenen Ersatz für die räumlichen Objekte können ebene Abbilder deshalb niemals bieten, weil bei ihnen notwendig eine Lösung von Akkommodation und Konvergenz stattfindet, und zwar, wie eine Betrachtung der Figuren 24 und 27 lehrt, auch dann noch, wenn Akkommodation und Konvergenz für einen Punkt, etwa den Hauptfixationspunkt, ausgeglichen wird. Der Einfluß dieser Lösung von Akkommodation und Konvergenz auf das binokulare Sehen ist zwar noch nicht ausreichend untersucht, indessen kann man doch wohl annehmen, daß sie in dem geringen Ausmaß, wie sie beim Stereoskopieren nach dem Ausgleich für den Hauptfixationspunkt in der Regel bloß noch erfordert wird, nicht weiter stört. (Eine absolute Divergenz, wie sie in Figur 24: $K_1 \alpha$, $K_2 \alpha'$ eingezeichnet ist, kommt bei richtig hergestellten Stereoskopaufnahmen nicht vor.)

stände selbst, weil ja hiervon die Ausnutzung der Querdisparation abhängt. Hier erheben sich nun Schwierigkeiten. Handelt es sich z. B. um Landschaftsbilder auf Papier, welche etwa im Verantstereoskop betrachtet werden, so kann schon die Vorstellung störend wirken, daß man einen nahen Gegenstand betrachtet, ferner die Fläche des Papiers. So erscheinen Diapositive, bei welchen die Störungen für das Verlegen des Bildes in die Ferne geringer sind, viel plastischer als Papierbilder (Heine[189]), S. 311; Kothe[211]), S. 321). Ein weiterer Umstand, auf den z. B. auch Stolze[242a]) nachdrücklich hinweist, ist der Einfluß des Vordergrundes auf den Tiefeneindruck eines Landschaftsbildes. Beim gewöhnlichen Sehen wandert der Blick frei von den nächsten Gegenständen (den sichtbaren Teilen des eigenen Körpers, vergl. Hillebrand[199]), S. 124 ff.) zu nahen und immer weiter entfernten, wir durchmessen die Tiefe sozusagen von einer Querdisparation zur anderen. Beim Fehlen des Vordergrundes muß also die Tiefenschätzung im Stereoskopbild leiden. Eine volle Übereinstimmung zwischen freier Betrachtung der Objekte selbst und zwischen ihrem Ersatz im Stereoskop läßt sich in dieser Hinsicht überhaupt nicht herstellen, weil ja die für die Tiefenschätzung der Kernfläche wichtigsten Motive, die sichtbaren Teile des eigenen Körpers, jedenfalls wegfallen. Es ist daher nicht auffallend, wenn in der Regel auch in Bezug auf die Plastik keine völlige Übereinstimmung zwischen dem richtig hergestellten Stereoskopbilde und dem wirklichen Aussehen der Objekte erzielt wird. Nimmt man, „um die Plastik zu verbessern," zu einer Vergrößerung des Objektivabstandes seine Zuflucht, so tritt andererseits, aus denselben Gründen wie beim Telestereoskop, eine sogenannte „Modellwirkung" auf, und es wird daher von diesem Vorgehen abgeraten (siehe F. Stolze[242a]), S. 12). Man vergleiche zu diesem Punkte ferner die Ausführungen von M. v. Rohr[230]). Über die photographische Praxis bei der Herstellung von Stereoskopbildern gibt das Buch von Stolze[242a]) reiche Aufklärung.

Streng vom vorigen zu unterscheiden ist der zweite Fall, daß man einen Gegenstand im Stereoskop im richtigen Verhältnis seiner Dimensionen sehen will, — sei es in natürlicher Größe, sei es nach allen Richtungen gleichmäßig vergrößert. Mit Rücksicht auf seine Beobachtungen über Orthoskopie hat Heine[189]) für die Aufnahmen in gleicher Größe folgende Vorschrift gegeben: Stereogramme in natürlicher Größe sind aufzunehmen und zu betrachten unter einem Konvergenzwinkel von 11°, welcher bei einer mittleren Pupillendistanz von 65 mm einem Objektabstand von 34 cm entspricht. Diese Entfernung lag bei den bisher untersuchten Personen im orthoskopischen Bereich. Bezüglich der Details der Ausführung (welche sich mit dem oben nach v. Rohr angegebenen Prinzip deckt) und der damit verknüpften theoretischen Fragen vergleiche man die Diskussion zwischen Heine[189, 191, 194]), Elschnig[180, 181]) und Kothe[211, 212]).

Das Prinzip, welches bei der Herstellung gleichmäßig vergrößerter (homöomorpher) Stereoskopbilder festzuhalten ist, wurde in neuerer Zeit von Greenough (vergl. Czapski[175])) ausgesprochen, und wurde dann der Konstruktion der Drünerschen Doppelkamera[177]) zugrunde gelegt: Es lautet nach v. Rohr([229]), S. 284 ff.): Setzen wir einen Beobachter voraus, der ein in bestimmter Entfernung befindliches Objekt mit beiden Augen betrachtet, so ändert sich an den Winkeln, unter welchen er das Objekt sieht,

(also auch am Konvergenzwinkel v der Hauptblicklinien) nichts, wenn man die Augendistanz des Beobachters, die Entfernung des Objekts und das Objekt selbst nach jeder Richtung hin gleichmäßig vergrößert. Denken wir uns daher einen Zwerg, dessen Augendistanz n mal kleiner ist als die des Menschen, so sieht dieser einen Gegenstand in der Entfernung a unter denselben Winkeln, wie der Mensch denselben n fach vergrößerten Gegenstand in der n fach größeren Entfernung A. Setzen wir demnach an die Stelle der Augen des Zwerges die Objektive zweier photographischer Apparate, deren Achsen unter demselben Konvergenzwinkel v gegeneinander geneigt sind, wie die Hauptblicklinien des Zwerges, erzeugen mit ihrer Hilfe zwei n fach vergrößerte physische Abbildskopien des Objekts und bringen diese, unter dem Winkel v gegeneinander geneigt, in die a gegenüber n fach größere Entfernung A vor unsere beiden Augen, so erhalten wir ein winkeltreu um das n fache vergrößertes Raumbild des Objektes. Wenn wir dieses aber auch wirklich orthoskopisch, d. h. in den richtigen Größenverhältnissen sehen wollen, so muß es nach den Versuchen Heines in den orthoskopischen Bereich verlegt werden. Daher fordert Heine[189], der im übrigen in ganz analoger Weise vorging, auch hier einen Konvergenzwinkel von 11°, welcher bei einer Pupillendistanz von 65 mm einem Objektabstand von rund 34 cm entspricht. Im Greenoughschen Mikroskop war ein Konvergenzwinkel von 14°, entsprechend einem Objektabstand von 25 cm eingehalten worden. Zur Betrachtung der Bilder empfiehlt Heine das Heringsche Haploskop, v. Rohr([233]), S. 186) kündigt für die von der Drünerschen Kamera gelieferten Bilder ein eigenes Stereoskop an.

V. Sehen von Bewegungen.*)

Um die untere Grenze der Winkelgeschwindigkeit festzustellen, bei welcher eine Bewegung eben noch unmittelbar als solche empfunden wird, bediente sich Aubert[256a]) (dort auch die ältere Literatur), wie vorher schon v. Fleischl[268]) in ähnlichen Versuchen, einer sehr gleichmäßig rotierenden Kymographiontrommel, auf welcher verschiedene Beobachtungsobjekte angebracht waren, nämlich: 1. ein Mm-Maßstab von Papier, 2. ein in je ein schwarzes und ein weißes mm (bezw. cm) geteilter Maßstab, 3. schwarze, 5 mm breite Streifen, 4. Doppellinien von 1 mm Breite und 4 mm Distanz voneinander. Der Beobachter saß in abgemessener Entfernung vor dem mit diffusem Tageslicht gut beleuchteten Zylinder, blickte auf ein gegebenes Zeichen nach den Beobachtungsobjekten und gab an, ob er Bewegung sah oder nicht. Die Beobachtungen wurden entweder bei ganz „freiem" Gesichtsfelde angestellt, oder bei „beschränktem Gesichtsfelde", wobei sich vor den Augen ein schwarzes Kästchen befand, welches nur für ein Auge einen schmalen Schlitz besaß, durch welchen kein anderer Gegenstand als das bewegte Objekt gesehen werden konnte. Die Anordnung läßt sich bei freiem Gesichtsfelde durch Anbringen seitlicher Fixationspunkte auch zu Beobachtungen über die Geschwindigkeitsgrenze im direkten Sehen brauchbar machen.

*) Über das Sehen während Bewegungen des Auges siehe unten S. 189 Anmerkung.

Um die Unterschiedsempfindlichkeit für Bewegungen festzustellen, wurden zwei Kymographiontrommeln nebeneinander von zwei verschiedenen Triebwerken aus in beliebig verschiedene Bewegung gesetzt. Ferner untersuchte Aubert[256b]) mit dieser Versuchsanordnung quantitativ einen zuvor schon von Fleischl[268]) nachgewiesenen Unterschied in der Geschwindigkeitsschätzung, je nachdem ob man dem bewegten Gegenstande mit dem Blicke folgt oder einen ruhenden Punkt fixiert. Vor den beiden Kymographiontrommeln, auf denen Papiere mit abwechselnd schwarzen und weißen vertikalen Streifen (Schreibunterlagen) rotieren, ist eine große schwarze Pappscheibe aufgestellt, in welcher sich zwei rechteckige Ausschnitte, vor jeder Trommel eine, befinden. In der Mitte des linken Fensters ist eine Fixationsmarke angebracht (ein Siegellackkügelchen an einem vertikalen Kokonfaden; v. Fleischl benutzte ein kleines Scheibchen, welches auf einem den Ausschnitt bedeckenden Gläschen angeklebt war*), das rechte Fenster ist frei. Der Beobachter sitzt von beiden Trommeln gleichweit entfernt, blickt abwechselnd auf das Fixationszeichen vor der linken Trommel und durch das freie Fenster auf die rechte Trommel, und vergleicht die Geschwindigkeit beider Bewegungen. Die Geschwindigkeit der Trommeln wird durch einen Gehilfen variiert.

Die Anordnung, welche Aubert[256b]) zur Untersuchung der Bewegungsempfindung bei Ausschluß aller ruhenden Objekte im Gesichtsfeld verwandte, ist wohl durch die neueren Anordnungen von Bourdon(2), S. 180 ff.) und von Ruppert[276]) überholt. In den Anordnungen der letzteren wird im Dunkelzimmer eine leuchtende Fläche — ein quadratischer, kreis- oder spaltförmiger Ausschnitt in schwarzem Papier — mittels eines Uhrwerkes mit variabler Geschwindigkeit vor dem Beobachter vorübergeführt. Ruppert benutzte ein Kymographion mit vertikal gestellter Heringscher Schleife. Zwischen die beiden Blätter der Papierschleife wurde ins Gerippe des Schleifenträgers eine matte Glühbirne gehängt. Der dem Untersuchten zugewandte Teil der Schleife besaß ein kreisrundes kleines Loch. Die beiden seitlichen Flächen des Apparates waren durch schwarzes Papier für Licht abgedichtet. Setzte man das Kymographion in Bewegung, während die Lampe leuchtete, so sah man einen hellen Punkt von oben nach unten wandern. Die Geschwindigkeit wurde am hinteren Teile der Schleife mittels eines elektrischen Schreibers gemessen, welcher nur solange als die Lampe glühte, in Schwingungen geriet. Der Stromkontakt wurde erst geschlossen, wenn das Kymographion in gleichmäßigem Gang war. 1″ danach unterbrach ein Metronom den Strom und die Lampe erlosch.**) Zu den Beobachtungen im indirekten Sehen, für welche der Apparat zunächst bestimmt war, wurde ein seitlicher Fixationspunkt, bestehend aus einer kleinen von hinten durchleuchteten Lücke in einem Blechzylinder, benutzt. Der Kopf des Beobachters ruhte auf einer Kinnstütze.

---

*) Mit einer ganz ähnlichen Versuchsanordnung hat v. Fleischl ebenda den Nachweis geführt, daß gerade Striche bei mäßiger Bewegung ihres Netzhautbildes gewellt erscheinen (siehe oben S. 105).

**) Diese Spezialeinrichtung diente ganz bestimmten Zwecken (siehe unten S. 186) und kann natürlich geändert werden.

Um die höchste Geschwindigkeit zu bestimmen, welche noch als Bewegung erkannt wird, führte Bourdon(2), S. 187 ff.) hinter einem horizontalen Spalt a (vergl. Figur 43) zwei schräge gut beleuchtete weiße Striche b und c auf schwarzem Papier in vertikaler Richtung rasch vorüber. Das Papier mit den Strichen war auf eine Trommel gespannt, welche von einem Uhrwerk mit meßbarer Geschwindigkeit gedreht wurde. Ist die Geschwindigkeit der Bewegung sehr groß, so erscheint der horizontale Spalt beim Passieren jeder Linie auf einmal kurz erleuchtet. Setzt man dann die Geschwindigkeit entsprechend herab, so sieht man einen Lichtfleck im Spalt nacheinander hin- und herhuschen. Mit einer einzigen Linie wird die Grenzbestimmung zu unsicher.

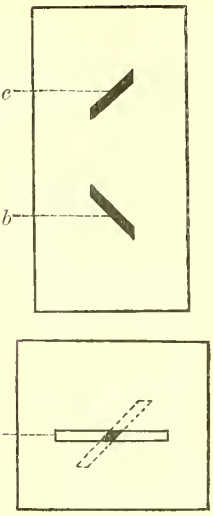


Fig. 43.
Nach Bourdon(2), S. 188).

Zur Messung des Gesichtswinkels der kleinsten Verschiebung, welche bei mittlerer Bewegungsgeschwindigkeit eben noch als solche wahrnehmbar ist, stellte Stern[277]) am Ende eines langen dunklen Korridors mit geschwärzten Wänden eine große, gleichmäßig von hinten beleuchtete Milchglasplatte auf und brachte vor ihr einen Pappschirm mit einem zentralen quadratischen Ausschnitt von 10 cm Seitenlänge an. Der Pappschirm ließ sich längs einer Millimeterskala zwischen zwei Anschlägen geräuschlos hin- und herbewegen. Die Bewegungen führte ein Gehilfe rhythmisch nach dem Takte eines geräuschlosen Pendels aus. Für das direkte Sehen wurde die Versuchsanordnung durch ein Makroskop verkleinert. Genauere Beobachtungen waren erst möglich, wenn ein oder zwei fixe Vergleichspunkte (Gasflammen) gegeben waren.

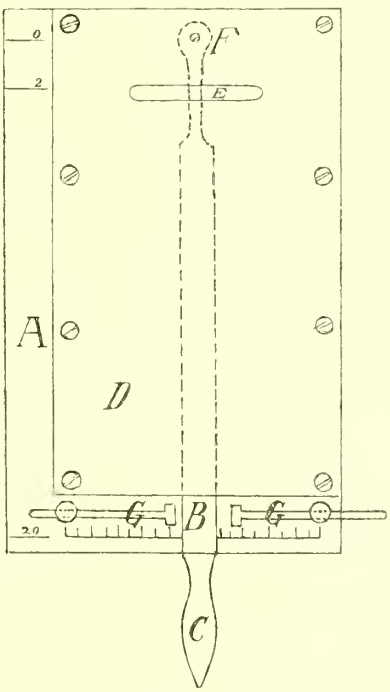


Fig. 44.
Nach Basler.

Basler[257 a]) hat zum gleichen Zwecke folgenden Apparat verwendet:

Auf einer Platte von starkem Messingblech A in Figur 44 ist um eine Achse F drehbar ein Hebel B angebracht, der sich mittels einer Handhabe C zwischen den Anschlägen G G hin- und herschieben läßt. Neben G befindet sich in 20 cm Entfernung von der Achse eine Mm-Skala. Der Stab ist durch ein zweites Messingblech D verdeckt bis auf die Handhabe C und ein 2 cm von der Achse entferntes Stück, welches durch den Spalt E hindurch sichtbar bleibt. Dieses letztere Stück des Stabes ist mit weißem Barytpapier überklebt, alles andere mit schwarzem Papier überzogen, namentlich wird auch die Handhabe und die sie bewegende Hand durch eine Überdachung aus schwarzem Karton verdeckt. Der Apparat wird in Augenhöhe an der Wand befestigt, der Kopf

des Beobachters in 2 m Entfernung mittels Kopfhalters fixiert, die Verschiebungen besorgt ein Gehilfe. Einer Verschiebung von 1mm an der Skala entspricht eine im Spalt sichtbare Verschiebung von 0,1 mm. Für Beobachtungen aus geringerer Entfernung, bei welchen der Beobachter die Verschiebung selbst vornehmen kann, benutzte Basler einen Apparat, in welchem der Hebel durch eine lange Latte ersetzt und die Mm-Skala in 200 cm von der Achse angebracht war, der also noch meßbare Verschiebungen von $^1/_{50} - ^1/_{100}$ mm gestattete.

Um den Apparat auch für Beobachtungen im Dunkelraum bei Ausschluß aller Vergleichsobjekte brauchbar zu machen, wurde der in E sichtbare Teil des Hebels mit einem schwach von hinten her beleuchteten Spalt versehen (Basler[257 b]). Für größere Verschiebungen, die insbesondere bei Beobachtungen im indirekten Sehen*) notwendig waren, wurde an diesem Apparate noch eine zweite analoge Schlitzvorrichtung in 14 cm Entfernung von der Achse angebracht.

Bei beiden genannten Autoren wird die Bewegungsgeschwindigkeit nicht genau gemessen. Dies geschah in der Anordnung von Ruppert (siehe oben S. 184), in welcher bei gleich langer Expositionszeit (1″) die Geschwindigkeit des bewegten Punktes und damit die Länge seines Weges so lange vergrößert wurde, bis die Bewegung im indirekten Sehen eben merkbar wurde.

Schätzungen über die scheinbare Größe des Ausschlags bei kleinen Bewegungen sind im indirekten Sehen von S. Exner[264]) ausgeführt worden, der damit auch einen Vergleich zwischen der Schätzung der Bewegungsgröße im direkten und indirekten Sehen verknüpfte. Exner brachte ein Pendel von 1—2″ Schwingungsdauer, an dem eine Kerze angebracht war, oder eine Hängelampe, mit kleinen Ausschlägen (unter 10 cm) zum Schwingen. Der Beobachter blickte abwechselnd nach dem Pendel und nach einem unter 45° seitlich gelegenen Punkte und verglich die scheinbare Größe der Elongation in beiden Fällen. Dressler[260]) gestaltete den Sukzessivvergleich zu einem Simultanvergleich um, indem er während direkter Beobachtung des schwingenden Pendels sein Spiegelbild auf der Netzhautperipherie entwarf.

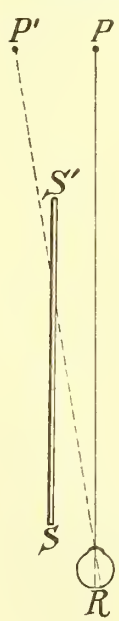


Fig. 45.

In die Medianebene wird ein Planspiegel S in Figur 45 so gehalten, daß sein Rand dicht medial vom rechten Auge R des Beobachters steht. Ein Pendel P wird so aufgehängt, daß es sich unter einem Winkel von 20°—30° spiegelt. P′ ist sein Spiegelbild. Man läßt nun das Pendel kleine Schwingungen senkrecht zur Spiegelebene ausführen, beobachtet es direkt und vergleicht seine scheinbare Geschwindigkeit mit der des indirekt gesehenen Spiegelbildes.

Schätzungen über die scheinbare Größe des Ausschlags bei kleinsten Bewegungen stellte auch Basler (l. c.) mit seinem Apparate an.

Nach anhaltender Betrachtung bewegter Objekte, deren Bilder in gleichmäßigem Fluß und in gleicher Richtung über die Netzhaut hingleiten, erscheinen ruhende Gegenstände, deren Bilder nachher auf dieselbe Netzhautstelle fallen, in einer der vorher beobachteten entgegengesetzten Bewegung — negatives Bewegungs-

*) Bestimmungen der eben merklichen Bewegungsgröße im indirekten Sehen hat zuerst S. Exner([263]), S. 162) mit Hilfe zweier an einer Drahtgabel befestigter Scheibchen ausgeführt.

nachbild (Uferphänomen; Beobachtungen im Eisenbahnwagen*)). Von den mannigfachen Experimenten darüber, welche sehr reichhaltig bei Szily[280]) zusammengestellt sind, sind folgende wegen ihrer Technik hervorzuheben: 1. Der Versuch mit der Spirale von Plateau[275]). Man zeichne auf eine kreisrunde, weiße Kartonscheibe einen vom Zentrum ausgehenden spiraligen schwarzen Streifen**), und setze die Scheibe um ihr Zentrum in gleichmäßige, nicht zu rasche Drehung. Je nach der Drehungsrichtung erhält man entweder den Eindruck, daß vom Zentrum aus fortwährend schwarze Ringe entstehen und allmählich an Größe zunehmend am Rande der Scheibe sich verlieren; oder, bei der entgegengesetzten Drehungsrichtung, daß die Ringe von allen Seiten der Peripherie gegen das Zentrum zu zusammenschrumpfen. Blickt man, nachdem man das Zentrum der Scheibe einige Zeit fest fixiert hat, auf ruhende Gegenstände, so scheinen diese im ersteren Falle in sich zusammenzuschrumpfen, im zweiten sich allseitig zu vergrößern.

Noch drastischer wird dieser, auf Ausschluß der Beteiligung von Augenbewegungen gerichtete, Versuch, wenn man nach Dvořák[261]) auf eine große weiße Scheibe mit einer Spirale eine kleinere, konzentrische mit einer entgegengesetzt laufenden Spirale legt, auf diese etwa noch eine dritte, noch kleinere mit der ersten gleichlaufende Spirale und auf das gemeinschaftliche Zentrum aller einen kleinen schwarzen Kreis. „Vor der so zusammengesetzten Scheibe mögen noch einige schwarze Fäden gespannt sein. Während nun die Scheibe gedreht wird, kann man das Zentrum ganz scharf fixieren, indem sich jede Blickschwankung sofort durch die hellen Nachbildränder des schwarzen Zentrums und der Fäden verrät. Sieht man dann nach einem weißen, liniierten Schirme, so erscheint auf demselben das dunkle Nachbild der Scheibe in drei teils schrumpfende, teils schwellende Ringe geteilt, und in diesem Nachbilde ganz fest und ruhig die hellen Nachbilder des Zentrums und der Fäden."

2. Nach längerer Betrachtung einer um ihren Mittelpunkt rotierenden stern- oder strahlenförmigen Figur scheinen ruhende Gegenstände — auch der Stern selbst nach plötzlichem Anhalten — sich in entgegengesetzter Richtung zu drehen. S. Exner[265]) verwendete bei einem unten zu besprechenden Versuche eine weiße Pappscheibe, auf welcher 15 schwarze Sektoren von je 5° Breite in gleichen Abständen aufgetragen waren, und welche 10 Umdrehungen in der Minute machte. Szily[280]) hat für alle solchen Versuche einen besonderen Drehapparat angegeben, welcher etwa ähnlich dem Rotheschen Farbenkreisel konstruiert ist, und sowohl rasche als auch sehr langsame Drehungen (mit der Hand) ermöglicht. Für bestimmte Zwecke verwendet er einen Doppeldrehapparat, welcher gestattet, zwei Scheiben nebeneinander mit gleicher Geschwindigkeit rotieren zu lassen.

Setzt man senkrecht zu einer rotierenden Strahlenscheibe einen Planspiegel und fixiert einen Punkt am unteren Rande desselben, so sieht man

*) Angaben über positive Bewegungsnachbilder nach kurzer Fixation hell beleuchteter, bewegter Objekte (analog den positiven Nachbildern im Lichtsinn) bei Engelmann[262]) und Stern([277]), S. 349ff.). Vergl. dagegen v. Szily([280]), S. 84; [281])).

**) Nach Oppel([273]), S. 557) wählt man am besten nicht zu große Kontraste, sondern macht die Spirale hell graugelb, den Grund mäßig dunkelgrau.

zwei nebeneinander in entgegengesetzter Richtung mit gleicher Geschwindigkeit sich drehende Scheiben und die entsprechenden Nachbilder (Hoppe[270]).

Bewegungsnachbilder lassen sich auch erzeugen durch gleichmäßiges Hingleiten des Blicks über ruhende Gegenstände. A. v. Szily[280], S. 105 ff.) und Kinoshita[271a]) haben dafür Versuchsanordnungen angegeben.

Zum Studium der binokularen Beziehungen der Bewegungsnachbilder setzte Exner[265]) während der Betrachtung der unter 2 beschriebenen Figur vor das eine Auge ein Reversionsprisma, durch welches die Bewegungsrichtung umgekehrt wurde. Wettstreit zwischen verschiedenen Richtungen im Nachbilde erzielte er ferner durch Beobachtung einer mit liniiertem Papier überzogenen Kymographiontrommel (siehe oben die Anordnungen von Fleischl und Aubert), während vor ein Auge ein Reversionsprisma so vorgehalten wurde, daß ihm die in Wirklichkeit von links nach rechts fortschreitenden Linien als von unten nach oben bewegt erschienen und die Bilder beider Augen, soweit es ging, zur Deckung gebracht wurden.

Die relative Bewegungsgeschwindigkeit eines Bewegungsnachbildes im Vergleich zu einem anderen bestimmten Borschke und Heseheles[258]) mit folgender Anordnung.

Nach Exner liefern zwei unter rechtem Winkel sich kreuzende Liniensysteme, die sich beide mit gleicher Geschwindigkeit senkrecht auf die Richtung der Linien durch das Gesichtsfeld bewegen, ein Nachbild, dessen Bewegungsrichtung diagonal, unter 45° gegen die Bewegungsrichtungen der beiden Vorbilder geneigt liegt. Wenn nun eines von den Vorbildern ein rascheres Bewegungsnachbild erzeugt, als das andere, so mußte die Bewegungsriehtung des Doppelnachbildes unter einem von 45° abweichenden Winkel zur Bewegungsrichtung der Vorbilder liegen. Zur Erzeugung der Bewegungsnachbilder dienten zwei senkrecht zueinander stehende Stabsysteme, bestehend aus Stricknadeln, welche nach Art einer Leiter mit ihren Enden an Bändern ohne Ende befestigt waren, und um je zwei senkreeht, bezw. wagreeht gestellte Walzen liefen. Die beiden Stabsysteme lagen dicht hintereinander; ihre Geschwindigkeit ließ sich, die eine unabhängig von der anderen, mit Hilfe von Kegelübersetzungen beliebig variieren. Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor. Die Anordnung war verdeckt durch einen Schirm mit kreisrundem Beobaehtungsausschnitt, innerhalb dessen ein Fixationspunkt angebraeht war. Die mattschwarzen Stäbe hoben sich von einem mattweißen Hintergrunde (einer von der Seite her beleuchteten Papierfläche) deutlich ab.

Über die Grenzen der Verwendbarkeit dieser Methode vergleiche man Szily[280]), ferner Brücke und Cords[259]), welche ihrerseits eine Methode zur angenäherten direkten Messung der Geschwindigkeit des Bewegungsnachbildes in der Weise ausarbeiteten, daß sie dasselbe auf einen in entgegengesetzter Richtung sich bewegenden Grund projizierten. Die Versuchsanordnung ist aus Figur 46 leicht verständlich.

$A A_1$ und $B B_1$ sind je 2 Kymographiontrommeln mit den Heringschen Schleifen a und b, K und K_1, Schirme mit Beobaehtungsausschnitten. Sp ist ein um D drehbarer Spiegel, der während der Beobaehtung des Vorbildes a zurückgeschlagen ist (gestriehelte Stellung). Nach Ablauf der Fixationszeit des Vorbildes wurde der Spiegel von einem Gehilfen rasch an den Ansehlag C gedreht und so dem Beobachter der „Nachbildgrund" b blaues Millimeterpapier eignete sieh am besten) sichtbar gemacht.*)

*) Während der Drucklegung dieses Beitrags veröffentlichte Basler (Pflügers Arch. 128, S. 145) eine andere Methode, die darin besteht, daß er die Geschwindigkeit des Bewegungsnachbildes mit der Hand nachahmte und die Handbewegung graphisch verzeichnete.

Bestimmungen der Dauer des Bewegungsnaehbildes unter versehiedenen Bedingungen siehe bei Kinoshita[271b]). Experimente über die Seheinbewegung ruhender Gegenstände in der Nähe bewegter (die Grundtatsaehen siehe bei Hering R. S. 557ff.) rühren von Bourdon(2), S. 199) her. Er braehte in einer Horizontalen nebeneinander einen festen und einen in horizontaler Riehtung mit beliebiger Gesehwindigkeit bewegliehen Leuehtpunkt an. Der letztere war mittels der oben S. 184 besehriebenen Kymographioneinriehtung erzeugt. Es wurde verglichen, welcher von beiden Punkten, bei aufmerksamer Fixation des einen oder anderen, und bei versehiedener Geschwindigkeit der Bewegung als ruhend, welcher als bewegt ersehien. Eine andere Anordnung bei Maeh(272), S. 104).

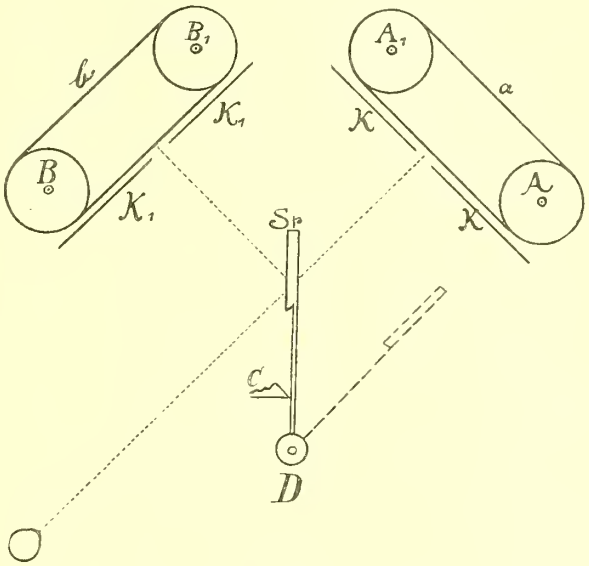


Fig. 46.
Nach v. Brücke und Cords.

Die Bedingungen für das Auftreten autokinetiseher Empfindungen (des Punktsehwankens, vergl. Zoth[8]), S. 374) prüfte Exner[266]) in der Weise, daß er im Dunkelzimmer einen leuehtenden Punkt von variabler Helligkeit (ein kleines Stüek des Kohlenfadens einer sehwaeh leuehtenden in ein Kästchen eingesehlossenen Glühlampe, welehes dureh eine kleine Lüeke des Kästehens siehtbar war) entweder bei Ausschluß aller sonstigen Objekte, oder bei Gegenwart anderer Lichtpunkte oder größerer sehwach leuehtender Fläehen fixierte.

Die Plateau-Zöllnersche Täuschung am Anorthoskop (vergl. Helmholtz O. S. 749; Hering R. S. 559ff; Zoth[8]) S. 373) wurde von Gertz[269]) und Stewart[278]) genauer studiert.

VI. Untersuchung der Augenbewegungen*).

A. Bestimmung des Drehpunktes des Auges.

Die älteren Methoden zum Naehweis eines festen Drehpunktes des Auges überhaupt und zur Bestimmung seiner Lage im Bulbus (Donders[301]), S. 156;

*) Über das Sehen während der Ausführung von Augenbewegungen vergleiche man: Maeh(272), S. 96) über die sogen. falsche Nachbildlokalisation, woran sich eine Anzahl von Abhandlungen in den ersten drei Bänden der Z. f. Psychol. anschließen; ferner Dodge[297]) und eine mir nicht zugängliche Abhandlung von Holt[322]), die ich nach dem Referat (Z. f. Psychol. Bd. 35, S. 69) zitiere.

J. J. Müller[334]); Volkmann[346]); Woinow[349]); Berlin[289]); Weiß[347])) sind von Hering (R. S. 456 ff.) zusammengestellt und ausführlich kritisiert worden. Ebenda finden sich auch die älteren Methoden zur Messung des Vortretens des Bulbus aus der Orbita beim energischen Öffnen der Lidspalte.

Seither hat Koster[327]) die Frage nach dem Drehpunkte des Auges nochmals auf folgende Weise untersucht: Es sei in Figur 47 s b a die Lage der Hauptvisierlinie in der Primärstellung, i k l die zugehörige Lage des Bulbus, g h gebe die Achse des Hornhautellipsoides an. Bewegt man nun den Bulbus so, daß die Hauptvisierlinie nacheinander in einer Ebene in zwei symmetrische Sekundärstellungen $s_1\ b_1'\ a_1'$ und $s_2\ b_2'\ a_2'$ gebracht wird, von denen die eine um den Winkel α nach rechts, die andere um den gleichen Winkel α nach links von der Primärstellung abweicht, so kann man die Lage des Drehpunktes im Auge ohne jede spezielle Voraussetzung (wie etwa die, daß er sich auf der Hauptvisierlinie befinde) berechnen. Er liege z. B. recht exzentrisch in m, so erhalten wir seine Lage, wenn wir die Visierlinie a s ins Auge hinein verlängern und von m das Lot m p auf diese Verlängerung fällen, aus den Strecken M p und p m. Um diese zu bestimmen, ging Koster folgendermaßen vor. In der Visierlinie s a befinden sich auf einem um M drehbaren Stäbchen die beiden Merkzeichen a und b. Wird das eine davon fixiert, so fällt sein scharfes Bild in die Mitte des Zerstreuungskreises des anderen hinein. Nun dreht man zunächst das Stäbchen mit den Merkzeichen in M um den Winkel α bis zur Stellung $M\ a_1 b_1$ und verschiebt sodann das Stäbchen parallel mit sich selbst so weit nach außen, bis die beiden Merkzeichen dem Auge bei der Fixation wieder gerade hintereinander erscheinen. Die Hauptvisierlinie hat dann die Lage $s_1\ b_1'\ a_1'$, das Auge liegt

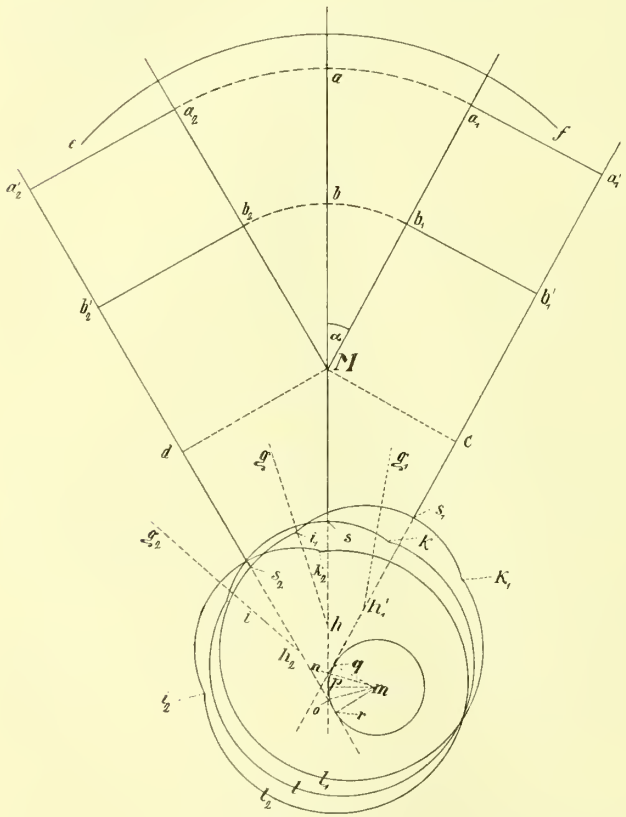


Fig. 47.
Nach Koster.

in $i_1 k_1 l_1$. Man mißt nun den Betrag der Parallelversehiebung, die Streeke M e, bringt dann das Stäbchen wieder nach $M b_1 a_1$ zurüek und dreht es darauf um M in die Lage $M b_2 a_2$, welche wieder um den Winkel α von M b a abweieht. Dann versehiebt man das Stäbehen wieder parallel mit sieh selbst nach der Seite, bis die Merkzeichen in einer Geraden hintereinander erscheinen, und mißt die Verschiebung M d; $i_2 k_2 l_2$ gibt die entsprechende Stellung des Bulbus und $a_2' b_2' s_2$ die zugehörige Riehtung der Hauptvisierlinie an. Nun ist man im Besitz der zur Bestimmung der Unbekannten M p und p m erforderliehen Daten.

Es ist $\sphericalangle$ M n e = $\sphericalangle$ M o d = $\sphericalangle \alpha$, der gemessen wurde. Da sieh m in gleiehem Abstand von den drei Lagen der Hauptvisierlinie befindet, sind die Lote mp, mq und mr gleich, und ist mn die Halbierungslinie des Winkels p n q, mo die Halbierungslinie des Winkels rop. Daraus folgt

$$o p = n p.$$

Aus $M p = M n + n p$ folgt ferner

$$2 M p = M n + M o.$$

Nun ist $M n = \frac{M e}{\sin \alpha}$ und $M o = \frac{M d}{\sin \alpha}$,

folglich $2 M p = \frac{M c + M d}{\sin \alpha}$, oder

$$M p = \frac{M c + M d}{2 \sin \alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1).$$

Die Unbekannte mp bereehnet man aus dem Dreieek nmp. Aus

$\sphericalangle$ n m p = $\sphericalangle$ n m q und aus

$\sphericalangle$ p m q = $\sphericalangle$ M n e = $\sphericalangle \alpha$ folgt

$$\sphericalangle n m p = \frac{\alpha}{2} \text{ und}$$

$$p m = \frac{n p}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}.$$

Da ferner $n p = \frac{o n}{2} = \frac{M o - M n}{2} = \frac{M d - M c}{2 \sin \alpha}$ (siehe oben!),

so folgt: $p m = \frac{M d - M c}{2 \sin \alpha \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$ . . . . . (2).

Bestimmt man auf diese Weise M p und p m für mehrere Werte von $\sphericalangle \alpha$ zunäehst in der horizontalen, sodann in der vertikalen Bliekebene, so ergibt sich daraus, ob die Lage der Drehungsachse im Auge für jede Bliekebene konstant bleibt, bezw. weiter ob es einen gemeinschaftlichen Sehnittpunkt der Drehungsaehsen für versehiedene Bliekebenen, einen allgemeinen Drehpunkt, mit konstanter Lage im Bulbus gibt.

Zur Ausführung dieser Bestimmungen ließ Koster einen Apparat von Kagenaar (Utreeht) herstellen. Mit demselben Apparate ermittelte er aueh die Versehiebungen des Bulbus in der Gesiehtslinie, indem er dem Auge entlang der Gesiehtslinie ein zu derselben senkreehtes Metallstäbchen von 1 mm Dieke soweit näherte, bis die Entfernung des Stäbehens von der Kornea gleieh der Dieke des Stäbehens war und dann die Lage des Stäbehens ablas.

Das Hervortreten des Bulbus aus der Orbita bei willkürlicher Erweiterung der Lidspalte u. s. f. verzeiehnete Tuyl[345]) graphiseh mit einem Sehreibhebel, welcher durch Vermittlung von gestielten Kappen verschiedener Größe (in anderen Versuchen mit einer

Gabel) auf der kokainisierten Kornea aufruhte. Ludwig[330]) machte photographische Aufnahmen von der Seite her.

B. Bestimmung der Primärstellung und der Netzhautorientierung bei Augenbewegungen. Parallele Rollung der Augen.

Nach dem Listingschen Schema der Augenbewegungen, welches allerdings die wirklichen Verhältnisse nur angenähert wiedergibt, gibt es eine ganz bestimmte Lage des Bulbus in der Orbita, und demgemäß auch eine ganz bestimmte Stellung der Gesichtslinie relativ zu den drei Hauptebenen des Kopfes, aus welcher heraus der Bulbus, wenn die Gesichtslinie eine beliebige ebene Bahn beschreibt, eine einfache Drehung um eine feste Achse ausführt, ohne gleichzeitige Rollung um die Gesichtslinie. Diese eine Lage des Bulbus, bezw. der Gesichtslinie nennt man die Primärstellung. Hat man bei horizontal liegender Blickebene (und parallel gestellten Gesichtslinien) dem Kopf diejenige Haltung gegeben, bei welcher sich die Gesichtslinien in der Primärstellung befinden, so nimmt auch der Kopf die Primärstellung ein.

Die Methoden zur Aufsuchung der Primärstellung der Augen sind dieselben, welche auch zum Nachweis des Listingschen Gesetzes*) benutzt werden. Sie sind ausführlich und genau bei Helmholtz (O. S. 657) und Hering (R. S. 471 ff.) unter Berücksichtigung ihrer geschichtlichen Entwicklung dargestellt. Ich kann mich daher hier darauf beschränken, unter fortwährender Bezugnahme auf diese Darstellungen kurz den Weg zu skizzieren, den man einzuschlagen hat, wenn man:

a) die Primärstellung der Augen und des Kopfes für spätere Versuche bestimmen will, oder wenn man

b) die Abweichungen vom Listingschen Gesetze genauer studieren will.

a) Das Aufsuchen der Primärstellung der Augen und des Kopfes erfolgt mit Hilfe der Nachbildmethode nach einem von Helmholtz[311]) angegebenen Prinzip. Auf einer möglichst großen und entfernten einfarbigen Wand werden im Kreuz ein horizontales und ein vertikales etwa $1^1/_2$ cm breites, gut abstechendes, z. B. rotes Band ausgespannt. Auf der Mitte der Durchkreuzungsstelle wird als Fixationspunkt eine schwarze Marke angebracht. „Parallel dem vertikalen Bande sind rechts und links, parallel dem horizontalen Bande oben und unten in regelmäßigem Abstande schwarze Schnüre über die Wand gespannt, so daß dieselben ein rechtwinkliges Gitter bilden".**) Vor diese Wand setzt oder stellt sich der Beobachter so hin, daß sich die Kreuzungsstelle der Bänder in gleicher Höhe mit den Augen und ungefähr in der Medianebene des Kopfes befindet. Der Kopf wird in aufrechter Stellung, das Gesicht parallel zur Wand, durch einen Kopfhalter fixiert. Hierauf erzeugt man sich durch anhaltende Fixation der schwarzen Marke in einem Auge ein dauerhaftes Nachbild der Bänder und läßt dann, ohne den Kopf zu verrücken, den Blick dieses Auges (während das andere geschlossen ist) langsam dem horizontalen Bande entlang nach rechts oder

*) Zur Veranschaulichung des Listingschen Gesetzes sind Modelle angegeben worden von Donders[302]), Hermann[315]), Browning[292]), Basler[288]). Vergl. auch die Modelle von O. Fischer im Katalog von Zimmermann (Leipzig).

**) Anordnung nach Hering. Helmholtz kontrollierte die Lage der Nachbilder an den vertikalen und horizontalen Konturen eines hellen Tapetenmusters.

links gehen. „Dabei wandert das Nachbild des roten Vertikalbandes als ein grüner Strich über die Wand, und erscheint immer parallel zu den schwarzen Vertikalschnüren, falls das Auge sich während der Fixierung der Marke wirklich in der Primärstellung befunden hat“. Das Nachbild des horizontalen Bandes fällt in diesem Falle stets mit dem Bande zusammen. Frischt man dann das Nachbild durch Fixation der Marke wieder auf, und läßt nun den Blick auf dem vertikalen Bande auf- und abgleiten, so erscheint das mitwandernde Nachbild des horizontalen Bandes immer parallel den horizontalen Schnüren, falls die Anfangsstellung die Primärstellung war. War dies nicht der Fall, „so bleibt bei Rechts- und Linkswendung des Blickes das Nachbild des vertikalen Bandes nicht parallel zu den vertikalen Schnüren und das des horizontalen Bandes erscheint als ein das rote Band im jeweiligen Fixationspunkte unter sehr spitzem Winkel schneidender grüner Strich; diesenfalls muß man den Kopf etwas vor- oder zurückneigen, bis man die richtige Stellung gefunden. Ist dies geschehen, und man läßt nun den Blick am vertikalen Bande hinauf- oder heruntergehen, und es erscheint jetzt das Nachbild des horizontalen Bandes nicht parallel mit den horizontalen Schnüren und wird das des vertikalen als ein gegen dasselbe etwas verdrehter grüner Strich gesehen, so muß man den Kopf ein wenig nach rechts oder links um seine vertikale Achse drehen, bis die richtige Stellung gefunden ist. Gelingt endlich der Versuch nach beiden Richtungen, so ist die Gesichtslinie in der Primärstellung“. Darauf wiederholt man den Versuch mit dem anderen Auge, und er wird, wenn der Kopf eine gerade Haltung hat, und wenn die Wand nicht zu nahe ist, so daß man die geringe Konvergenz der Gesichtslinien vernachlässigen kann, sogleich auch mit diesem Auge gelingen. Da sich überdies die Fixationsmarke in Augenhöhe befindet, die Blicklinien also in der Horizontale liegen, so hat man zugleich auch die Primärstellung des Kopfes bestimmt.

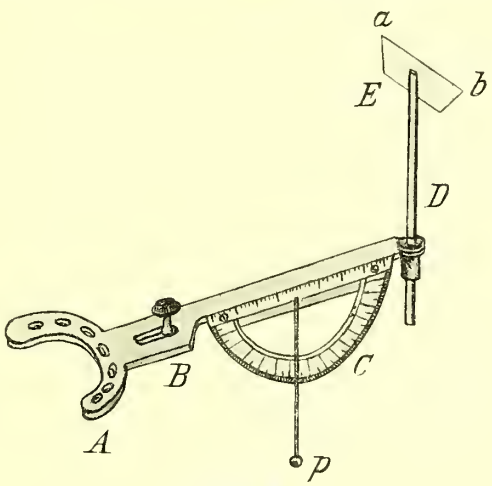


Fig. 48.

Um nun Kopf und Augen in einem folgenden Versuche leicht und sicher wieder in ihre Primärstellung bringen zu können, nimmt man während ihrer Bestimmung ein nach Hering kombiniertes Helmholtz-Bertholdsches Visierzeichen (Helmholtz, O. S. 657; Berthold[67], S. 115) in den Mund, welches nach einem von Herrn Geheimr. Hering zur Verfügung gestellten Photogramm in Figur 48 skizziert ist. An dem Beißbrettchen A, dessen Stiel B natürlich je nach der gewünschten Befestigung verschieden gestaltet sein kann, ist ein Metalltransporteur C angebracht, an dessen Teilung ein Pendel p spielt, welcher die der Primärstellung des Kopfes entsprechende Neigung des Beiß-

brettchens wiederzufinden gestattet. Das Helmholtzsche Visierzeichen, ein trapezförmiger, im Schlitze eines nach der Höhe verstellbaren Metallstabes D verschieblicher Kartonstreifen E, wird so zurechtgeschnitten und verschoben, daß beim Visieren nach der Fixationsmarke in der Primärstellung der Augen die Ecke a in der Visierlinie des linken, die Ecke b in der Visierlinie des rechten Auges liegt. Natürlich kann man sich des Beißbrettchens, das man in einem Halter um eine horizontalfrontale Achse drehbar befestigt, schon zur Fixation des Kopfes während der Aufsuchung der Primärstellung bedienen. Man sucht, wie oben, die Primärstellung auf, und liest dann die Neigung ab und stellt den Kartonstreifen richtig ein. Man hat nur darauf zu achten, daß sich die Augen bei der Vor- und Rückwärtsneigung des Kopfes nicht wesentlich aus der Horizontalebene der Fixationsmarke entfernen.

b) Das Studium der Abweichungen vom Listingschen Gesetze.

Die im vorigen beschriebene Methode des Aufsuchens der Primärstellung ist nicht sehr genau. Sowie aber die Methodik verfeinert wird, kommen auch die Abweichungen vom Listingschen Gesetz zum Vorschein. Hering(312), S. 80) fand dann für seine beiden Augen überhaupt keine einheitliche Primärstellung mehr, sondern es ließ sich bloß jene Stellung bestimmen, welche der nach dem Listingschen Gesetze geforderten Primärstellung am besten entspraeh. Für solche genaue Untersuchungen ist erforderlich eine sorgfältige Fixation des Kopfes, welche die Möglichkeit bietet, den Kopf um eine durch die Drehpunkte beider Augen gehende Achse nach vorn und hinten zu neigen (vergl. den Kopfhalter von Hering, unten S. 196); ferner eine Anordnung, welche eine schärfere Bestimmung der Lage der Nachbilder gestattet. Solche Anordnungen, welche insbesondere auch zur Bestimmung der, der Primärstellung am nächsten kommenden Augenstellung bei Myopen verwendet werden können, sind von Helmholtz (O. S. 659) und Hering(312), S. 74 ff.; R. S. 477) angegeben worden, auf deren genauere Beschreibung hier hingewiesen werden mag.

Eine objektive Methode, welche eine ziemlich genaue Bestimmung der Orientierung jedes Einzelauges für sich gestatten soll, hat in neuester Zeit Barnes[287]) angegeben.*) Der Apparat, den er verwendete, und den er „Torsiometer" nannte, bestand aus einem eisernen Halbkreis von 1 m Durchmesser, in dessen Zentrum das Auge des Untersuchten gebraeht wird. Dies geschieht in der Weise, daß an einem zwischen den beiden Enden des Halbkreises ausgespannten Faden das Zentrum desselben mit Tinte markiert wird. Dann stellt man das Auge so ein, daß der Tintenpunkt unmittelbar vor dem Zentrum der Pupille liegt. Der Kopf des Untersuchten wird sodann gut fixiert und der Faden beseitigt. Am eisernen Halbkreise ist ein kleines Fernrohr angeschraubt, dessen Okular mit einem feinen Faden und mit einem Zeiger versehen ist, welcher an einer Gradteilung die Einstellung des Fadens angibt. Das Fernrohr wird zunächst in der Mitte des in Grade geteilten Halbkreises gerade vor dem Auge des Untersuchten befestigt, auf die Iris der Versuchsperson scharf eingestellt, der Faden im Okular mit

*) Historisch stellt sich die Methode von Barnes als Fortführung eines schon von Wundt(254), S. 175 ff.) für andere Zwecke verwendeten Versuchsplanes dar.

einem der feinen radiären Striche der Iris zur Koinzidenz gebracht und die Lage des Fadens an der Okulargradteilung abgelesen. Dann wird das Fernrohr am Halbkreis um einige Grade nach der Seite gerückt, der Untersuchte macht eine ebensogroße Seitenwendung des Blicks, und man dreht nun das Okular so lange, bis der Faden wieder mit demselben Radiärstrich der Iris zusammenfällt wie vorher. Aus der Differenz der Ablesungen ergibt sich der Unterschied in der Orientierung des Auges. Barnes betont, man müsse durch Fixierenlassen eines „unendlich fernen" Punktes dafür Sorge tragen, daß die Gesichtslinien des Untersuchten immer parallel stehen, gibt aber nicht an, wie er dies speziell ausgeführt hat. Nach den Zahlen, die Barnes anführt, dürften die Fehlergrenzen bei seiner Methode nicht wesentlich von der verfeinerten Nachbildmethode von Helmholtz und Hering (siehe die vorige Seite) verschieden sein. Die von Fick[306]) verwendete Methode, die Grenze des blinden Flecks zu bestimmen, steht den besprochenen, jedenfalls der Nachbildmethode, an Genauigkeit nach.

Am allergenauesten werden die Abweichungen der Augenbewegungen vom Listingschen Gesetz nach der Substitutionsmethode ermittelt, allerdings nur insoweit, als es sich dabei um die Differenzen in der Orientierung beider Netzhäute handelt. Bezüglich der zahlreichen Anordnungen, welche für diese Untersuchungen angegeben worden sind, verweise ich wiederum auf Helmholtz (O. S. 662 ff.), und Hering (R. S. 480 ff.) und führe nur die sehr vielseitig verwendbare Anordnung von Hering([312]), S. 85) an.

Auf einem horizontalen, ebenen Tische ist die oben S. 138 beschriebene Tafel, auf der Vorderseite mit grauem Papier überspannt, vertikal aufgestellt. Statt der dort benutzten Fadeneinrichtungen sind aber, um die Bestimmungen noch schärfer zu gestalten, zwei lange, 15 mm breite Messingstreifen, um eine dem Drehpunkte jedes Auges gerade gegenüberliegende Achse drehbar, angebracht. „Der eine Messingstreifen reicht nach unten, der andere nach oben bis an den Rand der Tafel und trägt dort einen Nonius, welcher an einem graduierten Kreisbogen gleitet, so daß man die Abweichung des Streifens von der vertikalen Lage auf Minuten ablesen kann. Nach der anderen Seite reicht jeder Streifen weniger weit, um nicht durch zu große Länge die stärkere Verdrehung der Streifen gegeneinander zu hindern. Auf der vorderen Seite sind beide Streifen mit demselben grauen Papier überzogen, wie die Tafel; ihre beiden Drehpunkte sind mit Tinte deutlich markiert. Der eine Streifen ist durch ein weißes Roßhaar genau längs halbiert, der andere trägt zwei schwarze parallel gespannte Roßhaare, welche, das eine um 1 mm nach links, das andere um 1 mm nach rechts vom Drehpunkte des Streifens abweichen." Wenn die beiden Drehpunkte der Streifen binokular verschmelzen, so erscheint das weiße Roßhaar innerhalb der beiden schwarzen, und man kann aus der Stellung, welche man bei irgend einer Lage der Gesichtslinie den beiden Messingstreifen geben muß, damit die Roßhaare einander parallel erscheinen, erkennen, welche Lage die korrespondierenden Netzhautmeridiane zueinander haben.

Um nun zunächst die Untersuchung bei parallel geradeaus gestellten Gesichtslinien, aber verschiedener Neigung der Blickebene ausführen zu können, wird vor der Tafel ein von Hering angegebener Kopfhalter angebracht, welcher eine Vor- und Rückwärtsneigung des Kopfes um eine durch die Drehpunkte beider Augen ziehende Achse gestattet. Seine Konstruktion ergibt sich aus Figur 49, welche ihn im wesentlichen nach dem Katalog von Spindler u. Hoyer in Göttingen zeigt. Ein Beißbrettchen A ist an der Querstange B und diese an zwei winklig gebogenen Messingstangen D und D′ derart befestigt, daß bei angezogenen Schrauben C C′ und E E′ alle diese Stücke gemeinsam um die Achse FG drehbar sind. Mittels der Schrauben und Gegenschrauben C C′ kann das Querstück B nach vor- und rückwärts bewegt, mittels E E′ kann der Vertikalabstand von B und der Drehungsachse variiert werden. Man hat nun die Auf-

gabe, den in A eingebissenen Kopf so einzustellen, daß die Achse FG durch die Drehpunkte beider Augen geht. Um dies zu bewerkstelligen, stellt man vor dem am Brettchen fixierten Kopf einen vertikalen frontalen Spiegel auf, und gerade vor jedes Auge ein frontales Fadenkreuz mit vertikalem und horizontalem Schenkel. Deckt sich für jedes Auge das Fadenkreuz mit seinem Spiegelbilde (man richte es so ein, daß beide gleichzeitig ziemlich scharf gesehen werden können), so stehen die Gesichtslinien senkrecht auf der Spiegelebene. „Dreht man nun, während man den Mittelpunkt des Fadenkreuzes fixiert, den Kopf im Kopfhalter nach vorn oder hinten, und bleibt dabei die Deckung zwischen Fadenkreuz und Spiegelbild erhalten, so dreht sich der Kopf um die durch beide Drehpunkte der Augen gehende Achse." Genau wird dies nicht zu erreichen sein, man suche die Stellung, bei welcher die Verschiebung des Spiegelbildes auf ein Minimum gebracht wird. Eine andere Justierungsvorschrift bei Donders[303], S. 111), der auch den Kopfhalter etwas modifiziert hat. Der Kopfhalter wird sodann am Tisch vor der Tafel so aufgestellt, daß sich jedes Auge gerade vor dem Drehpunkte des zugehörigen Messingstreifens befindet (Kontrolle, wie oben S. 138 angegeben). Die Neigung der Blickebene wird an der Gradteilung des Kopfhalters, an welcher der Zeiger Z spielt, abgelesen.

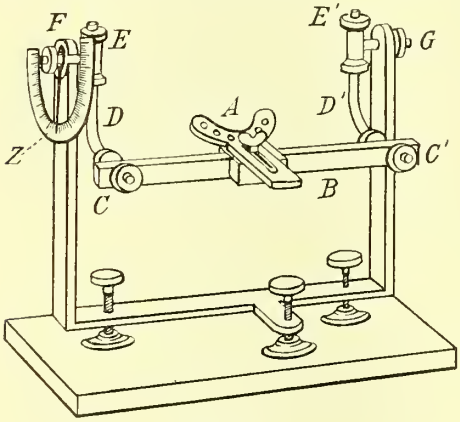


Fig. 49.
Vergl. den Katalog von Spindler u. Hoyer (Göttingen).

Die Versuchsanordnung gestattet weiterhin bei jeder Neigung der Blickebene eine Untersuchung bei Seitenwendung der parallel gestellten Gesichtslinien. Zu diesem Behufe verschiebt man die Tafel um einen abgemessenen Betrag nach der Seite. Um dies rasch bewerkstelligen zu können, markierte Hering auf dem Tische die beiden Punkte l und r, welche senkrecht unter den Drehpunkten der Augen lagen, und zog von jedem aus eine Linie geradeaus nach vorn, welche die Tafel senkrecht traf. Außer dieser Linie strahlen von l und r radienförmig weitere Linien aus, welche voneinander um je 5° abweichen. Die von l ausgehenden sind rot, die anderen schwarz gezeichnet, die Abweichung von der sagittalen Richtung ist in Graden an jeder angeschrieben. Außerdem sind über den Tisch in Abständen von je 1 cm frontale Querstriche gezogen (Zeichnung bei Hering, R. S. 483). Am unteren Rande der Tafel befinden sich zwei kleine Zeiger, welche bei der Mittelstellung der Tafel auf die beiden sagittalen, von l und r ausgehenden Linien eingestellt sind. Schiebt man die Tafel entlang einer Querlinie nach der Seite, bis die Zeiger auf zwei Radien eingestellt sind, welche etwa um 10° von der sagittalen Richtung abweichen, und richtet nun die Gesichtslinien wieder auf die Drehpunkte der beiden Messingstreifen, so entspricht das einer parallelen Seitenwendung der Gesichtslinien um 10°.

Endlich konnte Hering mit derselben Einrichtung auch Studien über die Stellung der Augen bei Konvergenz der Gesichtslinien ausführen, indem er die beiden Messingstreifen einander näherte, so daß sie um weniger als die Augendistanz voneinander abstanden, und nun entweder die Gesichtslinie jedes Auges auf den Drehpunkt des zugehörigen Messingstreifens einstellte, oder aber für stärkere Konvergenzen, die Gesichtslinien vor der Tafel kreuzte, so daß die des linken Auges auf den Drehpunkt des rechten, die des rechten Auges auf den Drehpunkt des linken Streifens eingestellt war. Der Konvergenzgrad wurde mit Hilfe der Teilung auf dem Tische bestimmt, indem Marken, welche senkrecht unter den Drehpunkten der Streifen am Rande der Tafel angebracht waren, auf die oben beschriebenen Radiallinien eingestellt wurden, welche die seitliche Abweichung der Gesichtslinie von der sagittalen Richtung in Graden angaben.

Sehr bequem kann ferner die Untersuchung der Netzhautorientierung bei den verschiedenen Richtungen der Blicklinie mit einem von Donders[303]) angegebenen Apparat, dem Isoskop, ausgeführt werden, bezüglich dessen auf die Originalarbeit verwiesen werden muß. Das Prinzip des Apparates, das in wesentlichen Punkten mit der im vorigen beschriebenen Anordnung übereinstimmt, findet man auch bei Hering (R. S. 499). Eine der oben S. 139 beschriebenen ähnliche Anordnung — zwei aus je einem rechten Winkel mit horizontalem und vertikalem Schenkel bestehende Halbbilder, welche sich im binokularen Sammelbilde zu einem Kreuz vereinigen — in Kombination mit dem Heringschen Kopfhalter beschrieb Donders([304]), S. 395) als Horopteroskop. Mit diesem Apparate wird für verschiedene Konvergenzgrade bestimmt, bei welcher Neigung der Blickebene die Querarme des Kreuzes genau horizontal erscheinen.

Mit Ausnahme der Substitutionsmethode eignen sich alle eben aufgezählten Methoden auch zum Nachweis bezw. zur Messung paralleler Rollungen der Augen um die Gesichtslinie, wie sie insbesondere bei seitlicher Kopfneigung auftreten. Bei den Versuchsanordnungen, welche speziell hierfür ausgearbeitet worden sind, mußten natürlich Änderungen der Blickrichtung, welche nach dem Vorigen an sich mit Rollungen verbunden sein können, vermieden werden.

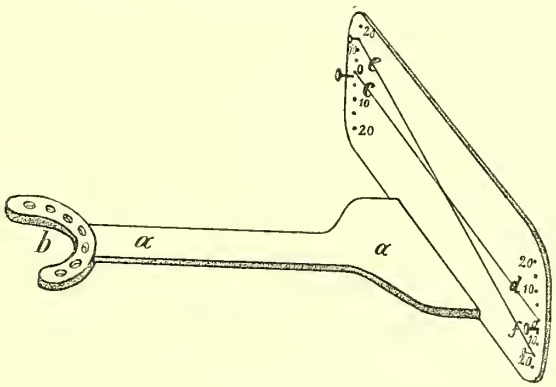


Fig. 50.
Nach Mulder[332]).

1. Die Nachbildmethode ist für den vorliegenden Zweck insbesondere durch Donders[304]) und seine Schüler Skrebitzky[341]) und Mulder[332]) modifiziert worden. Mulder fixierte den Kopf in einem Halter, der eine meßbare seitliche Neigung desselben um eine sagittale Achse gestattete, welche senkrecht auf der Mitte der Grundlinie der Augen stand. Kopf und Augen wurden zunächst in die Primärstellung gebracht und der Apparat so justiert, daß die Drehungsachse genau horizontal und sagittal lag. Zur Beobachtung der Nachbilder war in 6 m Entfernung vom Beobachter ein weißer Schirm von 1,5 m Durchmesser vertikal aufgestellt, in welchen ein horizontaler, 1 cm breiter und 70 cm langer Spalt eingeschnitten war. Hinter dem Spalte brannte eine Reihe von Gasflammen. Durch Fixation der Mitte des Spaltes wurde bei aufrechtem Kopf ein Nachbild dieses Lichtstreifens erzeugt. Dann wurde die Gaszufuhr zu den Flammen auf ein Minimum abgestellt, und der Kopf so weit nach der Seite geneigt, bis das Nachbild der Lichtlinie dauernd einer schon vorher schräg auf den Schirm gespannten Schnur parallel stand — Bestimmung der bleibenden Rollung.

Um auch die stärkere vorübergehende Rollung während der Kopfneigung zu messen, benutzte Mulder eine einfache Vorrichtung, Figur 50, bei welcher das Beobachtungsfeld fest mit dem Kopfe verbunden ist und die Neigung desselben mitmacht. Vermittels des Beißbrettchens b in Figur 50 wird ein Holzbrettchen a a im Munde gehalten, das am anderen Ende einen Schirm

trägt, auf welchem parallel zur Linie c d ein farbiger Papierstreifen befestigt ist, der nach Erzeugung eines dauerhaften Nachbildes wieder entfernt werden kann. Neigt man sodann den Kopf nach links, so wird das Nachbild mit der Linie c d einen Winkel bilden, dessen Größe sich auf ähnliche Weise, wie es unmittelbar vorher beschrieben wurde, mittels der schrägen Schnur e f, die unter verschiedenen Winkeln zu c d ausgespannt werden kann, bestimmen läßt. Andere Modifikationen dieser Anordnung siehe bei Hering (R. S. 508).

In der Versuchsanordnung von R. Angier[285]) wurde das Nachbild einer bei aufrechtem Kopf fixierten vertikalen Leuchtlinie (über deren Herstellung vergl. oben S. 129) nach der Kopfneigung auf einen 6 m entfernten weißen Karton, dessen Mitte fixiert wurde, projiziert, und der Neigungsgrad des Nachbildes dadurch bestimmt, daß ein Gehilfe nach dem Geheiß des Beobachters ein Lineal so lange drehte, bis sein Rand mit dem Nachbilde zusammenfiel.

2. Eine andere Methode, welche schon frühzeitig zum objektiven Nachweis der Augenrollung bei seitlicher Kopfneigung benutzt wurde (Literatur am ausführlichsten bei Nagel[337]), ist die direkte Beobachtung des Bulbus. Donders([304]), S. 409), ebenso Nagel (l. c.) empfehlen folgenden Vorgang. Man befestigt auf einem Brillengestell oder auf einer mit den Zähnen festgehaltenen Vorrichtung einen Spiegel derart, daß man sein Auge darin beobachten kann. Myope nehmen einen Planspiegel, Emmetrope am besten einen kleinen Hohlspiegel (etwa nach Donders eine auf der Rückseite mit einer Spiegelfolie belegte Konvexlinse), der das Auge vergrößert zeigt. Man fixiert im Spiegel seine im hellen Licht stark verengte Pupille und beachtet an den Radiärstreifen der Iris und an Konjunktivalgefäßen ihre Verschiebung gegenüber dem Lidrand.

3. Für Personen mit hochgradigem Hornhautastigmatismus gab Y. Delage[296]) eine Methode zur Messung der parallelen Augenrollung an, die in folgendem besteht: Die Versuchsperson ist an einem Stuhle festgeschnallt, der um eine sagittale, durch die Nasenwurzel verlaufende Achse drehbar ist. In einigen Metern Entfernung befindet sich vor dem Beobachter ein Schirm, in dessen Mitte gerade in der Verlängerung der Drehungsachse ein kleiner kreisrunder leuchtender Fleck angebracht ist, welcher infolge des Astigmatismus ein zu einer Ellipse verzogenes Netzhautbild liefert, deren lange Achse mit der Kopfdrehung ihre Richtung ändert. Das Maß für die Augenrollung ergibt sich aus dem Winkelunterschied zwischen dem Betrage der Kopfdrehung und der Drehung der Ellipsenachse. Zur Bestimmung der Richtung der langen Achse der Ellipse dient eine zweite helle Kreisscheibe, die an einem Zeiger angebracht ist, welcher sich um das Zentrum des ersten Kreises dreht. Dieses Scheibchen liefert wieder ein elliptisches Bild, und man reguliert die Länge des Zeigers so, daß sich die beiden Ellipsen mit beiden Enden ihrer langen Achsen gerade berühren. Bei jeder Neigung des Kopfes dreht ein Gehilfe den Zeiger so lange, bis diese Stellung erreicht ist.

Eine andere einfache Messungsmethode unter Benutzung eines Hornhautastigmatismus höheren Grades, wobei der Beobachtungsgrund die Kopfneigung mitmacht, gab A. Nagel[336b]) an.

Zum bloßen Nachweis der Augenrollung kann man nach W. Nagel[337]) auch die durch den unregelmäßigen Linsenastigmatismus erzeugte Strahlenfigur eines fernen leuchtenden Punktes benutzen. An einem gut sitzenden Brillengestell befestigt man in deutlicher Sehweite vor dem einen Auge ein Fadenkreuz in drehbarer Fassung, oder statt dessen ein Glimmerplättchen mit eingeritztem Kreuz. „Man visiert dann bei aufrechter Kopfhaltung so, daß der Mittelpunkt des Fadenkreuzes mit dem Mittelpunkte der Strahlenfigur zusammenfällt, und stellt dann das Kreuz so ein, daß die eine Linie desselben in die Richtung eines besonders kenntlichen Strahls der Linsenfigur zu stehen kommt." Bei seitlicher Kopfneigung sieht man dann ein Zurückbleiben des Strahls.

4. Die Ficksche Bestimmung der Grenze des blinden Flecks wurde von Contejean und Delmas[294]) und von Nagel[337]) zur Messung der parallelen Rollung verwendet. Nagel verfuhr folgendermaßen: Er befestigte an einer senkrechten Wand in 1 m Entfernung vom fixierten Kopf ein Kartonstück, welches um einen Stift drehbar war. Letzterer trug einen Zeiger, welcher an einer auf dem Karton angebrachten Gradteilung den Drehungsgrad des Kartons angab. An seinem vorderen Ende trug der Stift einen vertikalen kleinen Spiegel S. Ferner war auf dem Kartonblatt ein kleiner schwarzer Fleck in einem solchen Abstand vom Drehpunkte angebracht, daß er durch Drehung des Kartons auf den blinden Fleck gebracht werden konnte. Um die Konstanz der Blickrichtung bei der Kopfneigung zu sichern, benutzte Nagel eine ähnliche Einrichtung wie Contejean-Delmas, nämlich das oben schon erwähnte Brillengestell mit Fadenkreuz und visierte so, daß das Zentrum des Kreuzes und das Spiegelbild der Pupille im Spiegel S sich bei jeder Neigung des Kopfes deckten. Dann wurde bei aufrechtem und bei geneigtem Kopf durch Drehen des Kartons die Grenze bestimmt, bei welcher der schwarze Fleck eben auf dem blinden Fleck verschwand, bzw. neben ihm wieder auftauchte. Der Grad der Kopfneigung wurde vermittels eines am Brillengestell befestigten Pendels, welches an einer Gradteilung spielte, angezeigt. Die Methode ist von Mulder[333]) dadurch verbessert worden, daß er die Einrichtung zur Grenzbestimmung des blinden Flecks auf einem mittels Beißbrettchens getragenen, daher fest mit dem Kopf verbundenen Sehirm anbrachte (ähnlich wie in Figur 50), und so jede Änderung der Blickriehtung bei der Kopfneigung ausschloß.

C. Assoziation der Augenbewegungen und ihre Lösung. Fusionsbewegungen. Einstellung der Augen bei Ausschluß des Fusionszwangs.

Die einfachen Beobachtungen, welche beweisen, daß sich die willkürlichen Innervationen normalerweise stets auf beide Augen in gleichem Ausmaß erstreeken, sind bei Hering (R. S. 523ff.) zusammengestellt und sollen hier nicht nochmals wiederholt werden. Von den Fällen einer Lösung dieser Synergien ist neuerdings insbesondere die Lösung der Akkommodation und Konvergenz mehrmals untersucht worden. Man bezeichnet als relative Fusionsbreite den Spielraum, innerhalb dessen bei einem bestimmten Akkommodationszustande der Konvergenzgrad geändert werden kann, und als relative Akkommodationsbreite den Betrag, um welchen bei gegebener Konvergenz die Akkommodation vermehrt oder vermindert werden kann.

Der Nachweis der relativen Fusionsbreite erfolgt durch Vorsetzen von Prismen mit temporal- oder nasalwärts gerichteter brechender Kante vor das Auge: der Nachweis der relativen Akkommodationsbreite durch

Vorsetzen von Konkav- bezw. Konvexgläsern vor beide Augen bei gleichbleibender Konvergenz der Gesichtslinien (Donders[301]). Zur genaueren Untersuchung bedient man sich am zweckmäßigsten des Heringschen Haploskops (vergl. oben S. 152ff.), welches eine ganz allmähliche Änderung der Akkommodation bezw. Konvergenz und zwar jeder für sich, herbeizuführen gestattet. Als identische Probeobjekte verwendeten Pereles und Halsch[339] bei diesen Versuchen Banknoten, welche sehr gleichmäßig gedruckt sind und sehr feine Details aufweisen, deren Unscharfersheinen als Kriterium der Grenze für die Lösung der Assoziation diente.

Für ganz exakte Messungen ist dann aber noch zu berücksichtigen die Änderung der Pupillenweite, ferner der Umstand, daß sich beim Verschieben der Objekte ihre Beleuchtung ändern kann. Endlich ist darauf zu achten, daß man bei komplizierteren Objekten je nach ihrer Entfernung vom Auge verschieden große Details zur Beurteilung des Scharfsehens heranzieht. Um diese Fehlerquellen auszuschalten, bestimmte Hess[318] den relativen binokularen Nahe- und Fernpunkt bei wechselnder Konvergenz nach der Scheinerschen Methode und bediente sich dabei eines modifizierten Haploskops.

An Stelle der gewöhnlichen Spiegelchen wurden total reflektierende Prismen angebracht. Vor der dem rechten Auge zugekehrten Prismenfläche befand sich eine Blende mit zwei feinen, senkrecht übereinander stehenden Öffnungen, deren Mittelpunktsabstand cca. 1,5 mm betrug. Dicht vor der dazu senkrechten (dem Sehobjekt zugekehrten) Prismenfläche war ein Halter zur Aufnahme eines Konvexglases so angebracht, daß für einzelne Beobachtungen das Glas leicht vorgelegt bezw. weggeschoben werden konnte. Als Objekt für das beobachtende rechte Auge diente ein feinstes leuchtendes Pünktchen, das in folgender Weise erhalten wurde: In einer 5 cm langen Röhre war lichtdicht ein Glühlämpchen eingeschlossen. Die dem Prisma zugekehrte Röhrenöffnung war durch einen Metalldeckel verschlossen, in dessen Mitte eine hinten mit Seidenpapier überklebte feine Öffnung gebohrt war. Für verschiedene Entfernungen waren leicht auswechselbare Deckel mit verschieden großer Öffnung vorgesehen. Das Objekt für das linke Auge war eine ebenso beschaffene, nur noch feinere Öffnung, welche mit rotem Glas gefärbt war, und deren Lichtintensität durch Milchgläser beliebig abgeschwächt werden konnte. „Der durch den Apparat blickende Beobachter sah also mit seinem rechten Auge ein helles gelbweißes Pünktchen, das bei nicht genauer Einstellung in zwei zerfiel, mit dem linken Auge ein kleineres, lichtschwächeres rotes Pünktchen, welches bei allen in Betracht kommenden Konvergenzgraden leicht mit dem weißen (bezw. einem von den weißen) verschmolzen werden konnte. Die rötliche Färbung des haploskopisch gesehenen Bildes machte in jedem Augenblicke die Kontrolle für Einhaltung der gewünschten Blickrichtung leicht und infolge der geringen Größe des roten Pünktchens war es nicht schwer, das weiße Pünktchen ungestört zu beobachten und bei Änderung der Konvergenz oder Akkommodation zu bestimmen, wann es zu einer vertikalen Ellipse verzogen erschien, oder deutlich doppelt gesehen wurde.“ Die Versuchsanordnung ermöglichte ferner, bei den verschiedenen Messungen angenähert gleiche Stellen des Pupillargebietes zu benutzen. Darüber sowie über verschiedene Abänderungen der Methode muß auf das Original verwiesen werden.

Behufs Untersuchung der Frage, ob beim Normalen im Interesse des deutlichen Sehens eine ungleiche Innervation des Ciliarmuskels in beiden Augen möglich ist, änderten Hess und Neumann[319] im Heringschen Haploskop den Abstand des einen von zwei ursprünglich in gleicher Entfernung vom Auge angebrachten Objekten so lange, bis beide Objekte nicht mehr gleichzeitig scharf gesehen werden konnten. Als Beobachtungsobjekte dienten Kokonfäden, entweder allein auf gleichmäßigem Grund oder über identische Druckschriften gespannt. Um in diesen Versuchen trotz ungleicher

Entfernung der Objekte vom Auge die Größe ihrer Netzhautbilder gleichzuhalten, bot Koster[328], S. 144ff.) den Augen im Haploskop zwei einander vollkommen ähnliche Objekte, deren Größe aber entsprechend ihrem Abstand vom Auge veränderlich war.

Zu diesem Zwecke konstruierte er sich einen Apparat, vergl. Fig. 51, „wobei als Objekt ein gleichseitiges Dreieck aus weißer Pappe gewählt wurde; während der Apparat cde über einer horizontalen Fläche dem Auge näher geschoben wurde, senkte sich das

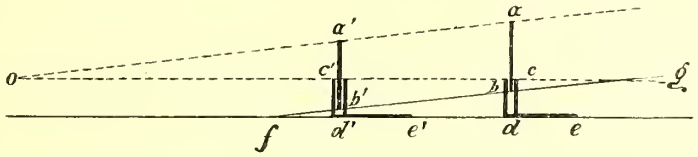


Fig. 51.
Nach Koster[328]).

Dreieck ab zwischen zwei schwarzen Schirmen cd, indem es sich über einer schiefgestellten Ebene fg fortbewegte. Ist der Winkel gfe gleich dem Winkel, unter welchem das weiße Dreieck von dem Auge o wahrgenommen wird, so bleibt der Gesichtswinkel für alle Abstände derselbe."

An die Konvergenzänderungen, welche bei gleichbleibender Akkommodation durch eine künstlich herbeigeführte Querdisparation der Netzhautbilder erzeugt werden können, schließt sich nach ihrer Erzeugung und nach dem sonstigen Verhalten an die absolute Divergenzstellung der Gesichtslinien. Man kann sie herbeiführen durch Vorsetzen von Prismen vor das Auge mit temporalwärts gerichteter brechender Kante, besser, weil stetiger, durch allmähliche Entfernung zweier stereoskopischer Halbbilder voneinander (Beeker und Rollett[168])), oder durch Drehung der Arme eines Heringschen Haploskops über die Nullstellung hinaus (gegen die Enden A und B in Figur 25 zu). Dabei folgen die Augen der Objektversehiebung bald nicht mehr ganz, sondern nur soweit nach, dass das Auftreten von Doppelbildern vermieden wird. Die wirkliche Divergenzstellung der Gesichtslinien muß man dann in der Weise messen, daß man auf dem einen Halbbilde einen vertikalen Strich anbringt, auf dem anderen eine horizontale Reihe von Punkten, welche einen bestimmten (etwa 1 mm) Abstand voneinander haben. Jener Punkt, über welchen der Vertikalstrich im binokularen Sammelbilde bei genau eingestellten Gesichtslinien hinwegzieht, wird mit Null bezeichnet. Entspricht die Stellung der Gesichtslinien nicht mehr der am Haploskop eingestellten Divergenz, so zieht der „Kontrollstrich" über einen anderen Punkt der Reihe hinweg und dessen Abstand vom Nullpunkt gibt das Maß der nicht ausgeglichenen Querdisparation an (Hofmann und Bielschowsky[321*])).

Außer durch Querdisparation kann man aber auch durch beliebige andere Verschiebungen identischer Bilder beider Augen gegeneinander, wenn sie allmählich vorgenommen werden und gewisse individuell verschiedene

*) Ganz ebenso kann man bei Versuchen über die relative Fusionsbreite verfahren, da bei etwas weitergehender Lösung von Akkommodation und Konvergenz ganz ähnliche Verhältnisse eintreten wie bei höheren Graden absoluter Divergenz (siehe F. B. Hofmann[320 a])).

Grenzen nicht übersehreiten, Fusionsbewegungen auslösen. Man führt sie gewöhnlich sehematiseh auf zwei Typen zurück: die Vertikaldivergenz und die gegensinnige Rollung der Augen um die Gesiehtslinie, die natürlich beliebig miteinander kombiniert sein können.*)

Vertikaldivergenz kann man hervorrufen: dureh Vorsetzen von Prismen mit naeh oben oder unten geriehteter brechender Kante vor ein Auge (Literatur bei Hofmann und Bielsehowsky[321]); dureh gegenseitige Versehiebung zweier stereoskopiseher Halbbilder der Höhe nach (Panum, Nagel) z. B. aueh, wenn man zwei miteinander fest verbundene Stereoskopbilder beim freiäugigen Stereoskopieren um eine zwisehen ihnen liegende sagittale Aehse allmählieh dreht (vergl. Hermann[316]). Zu messenden Versuehen eignet sieh wieder am besten das Spiegelhaploskop, in welehem zwei identisehe Objekte angebraeht werden, von denen das eine parallel mit sich selbst nach oben oder unten versehoben wird. Da aueh hier die Vertikaldivergenz sehr bald hinter der Objektversehiebung zurückbleibt, kann man zur Messung der Vertikaldivergenz wieder einen — diesmal horizontalen — Kontrollstrieh auf dem einen Halbbilde und eine vertikale Punktreihe auf dem anderen Halbbilde anbringen (über eine andere Art der Bestimmung des Divergenzmaximums siehe Hofmann und Bielsehowsky l. e.) Um gegensinnige Rollungen hervorzurufen, bediente sieh Helmholtz (O. S. 634) einer Prismenkombination; Nagel[336a]) bewirkte die Rollung dureh Drehung eines Halbbildes im Stereoskope. Hofmann und Bielsehowsky[321]) benutzten das Heringsehe Haploskop, in welehem in den Rahmen R und R′ zwei drehbare mit identisehen Drueksehriften überklebte Zinkseheiben angebracht waren. Da aber die Rollung der Augen sehr beträehtlieh hinter der Verdrehung der Objekte zurückbleiben kann, ohne daß störende Doppelbilder auftreten, braehten Hofmann und Bielsehowsky (l. e.) zur Messung des Rollungswinkels in dem einen Gesiehtsfelde einen isoliert für sieh drehbaren Draht an, weleher einer geraden Linie im anderen Gesiehtsfelde parallel gestellt werden konnte.

Zu diesen genaueren Versuehen verwendeten Hofmann und Bielsehowsky ein von R. Rothe (Leipzig) naeh Herings Angaben konstruiertes Haploskop, welehes außerdem eine Untersuehung der Rollung bei versehiedener Neigung der Bliekebene gestattet, und das nach einem von Herrn Geheimrat Hering zur Verfügung gestellten Photogramm in Figur 52 skizziert ist.

Auf einer Drehbankwange sind mittels vier an beliebigen Stellen fixierbarer Gleitstüeke fogende Teile angebraeht: ein Beißbrettehen A, ein Spiegelapparat B, zwei drehbare Seheiben C und C′. Der Spiegelapparat besteht aus zwei unter 45° gegen die Sagittale geneigten Spiegeln, deren Justierung in ähnlieher Weise erfolgt, wie es oben S. 156 beschrieben wurde. Die Spiegel können auf und mit dem Dreikantstabe ab naeh rechts und links verstellt werden, und sie sind mitsamt dem Halter a b und dem Bügel e′ um eine dureh den Stift e verlaufende horizontale Aehse drehbar. Der Betrag der Drehung ist

*) Der Trennung in Vertikaldivergenz und gegensinnige Rollung wäre über das vereinfachende Schematisieren hinaus nur dann eine selbständige Bedeutung zuzuerkennen, wenn es für jede dieser Bewegungen eigene Zentren gäbe, was ja manche Autoren annehmen.

an einer vorne an den beiden Bogen e e′ befindlichen Gradteilung ablesbar. Wird der Kopf in A so eingestellt, daß die Verlängerung der Drehungsachse c durch die Drehpunkte beider Augen hindurchzieht, so werden bei Drehung der Spiegel um die Achse c die Vorderflächen der Scheiben C und C′ so gespiegelt, daß sie bei einer dem Drehungsgrade entspreehenden Blickhebung bezw. Blicksenkung stets senkrecht auf den naeh ihren Zentren gerichteten Gesichtslinien liegen.

Die Vorderflächen der Scheiben C und C′ werden mit identischen Druckschriften überklebt und durch Drehung einer oder beider kann dann eine gegensinnige Rollung der Augen ausgelöst werden. Die Messung der Objektdrehung erfolgt an einer Gradteilung auf der Rüekseite der Seheibe, zur Messung der Augenrollung wurde der isoliert für sich drehbare Draht d angebracht.

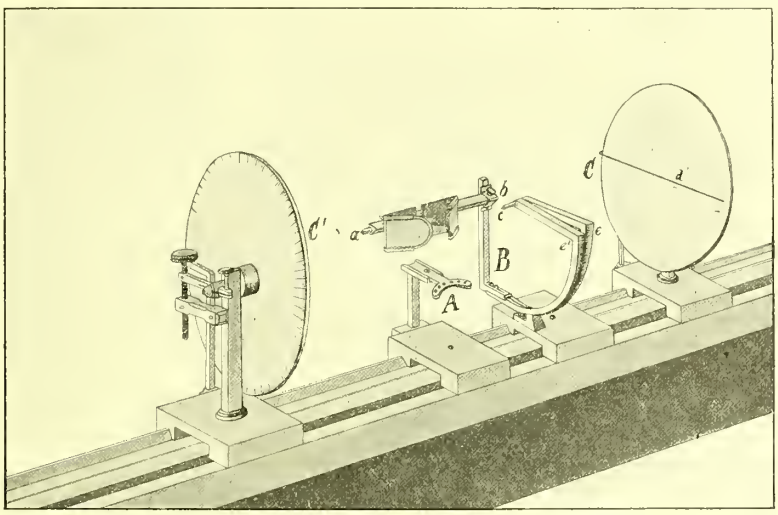


Fig. 52.

Die Art, wie dessen isolierte Drehung erfolgt, ist aus Figur 53 ersichtlich, welche die Vorrichtungen an der Rückseite der Scheiben wiedergibt. a ist der feststehende Index, an dessen scharfem Rande der Grad der Objektdrehung abgelesen wird. Der Metallstreifen b, dessen nach vorne zu umgebogener Teil in den Draht d in Figur 52 übergeht, ist fest an einem Querstück c angeschraubt. Letzteres ist zum Teil durch den Sehlitz d längs gespalten, so daß es, wenn die Schraube e gelockert ist, lose auf der Drehungsachse der Metallscheibe, deren Ende bei h schematisch (etwas von den wirklichen Verhältnissen abweichend) angegeben ist, schleift. Infolgedessen kann man durch Drehen der Schraube f, welche c mit dem festen Querstück g verbindet, das Stück c samt dem Streifen b um die Achse h drehen (Betrag der Drehung an der Gradteilung ablesbar), ohne daß die Metallscheibe sich mitdreht. Die Scheibe dreht sich erst dann mit, wenn man die Schraube e anzieht und dadurch den geschlitzten Teil des Querstückes c fest auf die Achse h aufpreßt. Über andere Versuchseinrichtungen, welche insbesondere

zur Messung der Rollung jedes Einzelauges verwendet wurden (Nachbildmethode!) siehe die Abhandlung selbst!

Die Untersuchungen der Einstellung der Gesichtslinien bei Ausschluß des Fusionszwanges*) ist zwar in erster Linie für die Klinik wichtig, muß aber bei der Häufigkeit der sogenannten Heterophorien auch vom Physiologen berücksichtigt werden.

Unter Heterophorie (Stevens[342]) versteht man eine Abweichung der Gesichtslinien vom Parallelismus an sonst normalen Augen bei fusionsfreiem Blick in die Ferne. Konvergieren die Gesichtslinien dabei in horizontaler Richtung, so bezeichnet man dies als Esophorie. Divergenz in horizontaler Richtung nennt man Exophorie, Höhendivergenz Hyperphorie. Zu diesen Abweichungen der Gesichtslinien vom Parallelismus kommt nun häufig eine geringe gegensinnige Rollung der Augen (ziemlich überflüssig als Zyklophorie bezeichnet) hinzu. Die Methoden zur Messung dieser Rollung bei Ausschluß jedes Rollungszwanges wurden oben S. 138ff. angegeben.

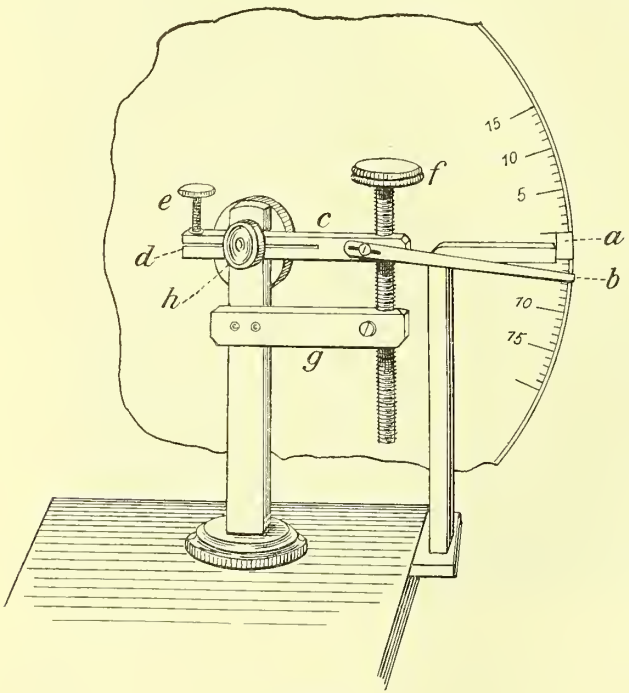


Fig. 53.

Um den Grad der Heterophorie möglichst vollständig zu bestimmen, müssen den Augen auf gleichmäßigem Grunde Objekte dargeboten werden, welche wenigstens nach der zu untersuchenden Richtung hin keine Fusionstendenz anregen. Die Untersuchungsmethoden sind demnach dieselben, wie die von den Klinikern beim Nachweis des „latenten Schielens“ geübten. Folgende sind die wichtigsten.

1. Der „Gleichgewichtsversuch“ nach von Graefe. Vor ein Auge wird ein starkes Prisma mit nach oben gerichteter brechender Kante vorgesetzt. Von einem entfernten schwarzen Punkt auf einer gleichmäßig weißen Fläche sieht der Untersuchte dann höhendistante Doppelbilder, die bei Orthophorie genau übereinander stehen, bei Eso- oder Exophorie auch einen

*) Von den Ophthalmologen als „Gleichgewichtsstellung“ oder „Ruhestellung“ bezeichnet, wofür man aber, um das häufige Mißverständnis zu vermeiden, als ob dabei keine Innervation der Augenmuskeln erfolgte, besser „fusionsfreie“ oder kurz „freie Einstellung“ der Augen sagen sollte. Die theoretische Behandlung der Frage siehe bei Hofmann[320 b]).

seitlichen Abstand besitzen, den man durch weiteres Vorsetzen jenes ab- oder adduzierenden Prismas, das den Seitenabstand gerade ausgleicht, auch messen kann. Stevens[342]) hat diese Methode auch zur Messung der Hyperphorie benutzt, indem er das stark ablenkende Prisma mit temporal gerichteter brechender Kante vorsetzte, und einen eventuellen Höhenabstand der Doppelbilder durch vertikal ablenkende Prismen ausglich. Er hat ferner die ganze dazu notwendige Einrichtung auf einem Stative befestigt, und dem so zusammengestellten Apparate den seither gebräuchlichen Namen Phorometer gegeben.

2. Da beim v. Graefeschen Gleichgewichtsversuch manche Personen die Neigung haben, die seitlich distanten Doppelbilder durch willkürliche Konvergenz übereinander zu stellen, hat A. Graefe([308]), S. 195, später auch Duane[305]) die Scheinbewegung des Objekts bei alternierendem Verdecken des einen und anderen Auges zum Nachweis der Heterophorie benutzt: sog. Verschiebungsprobe, „parallax test“). Bleibt die Gesichtslinie des verdeckten Auges auf das Fixationsobjekt eingestellt, so fällt beim nachherigen Aufdecken dieses Auges und gleichzeitigem Verdecken des anderen das Bild des Objekts auf identische Netzhautstellen, ändert also seinen Ort im Sehfelde nicht. Weicht dagegen die Gesichtslinie des Auges unter dem deckenden Schirm von der Fixationsrichtung ab (Heterophorie), so erfolgt beim Aufdecken dieses Auges (und gleichzeitigem Verdecken des anderen) eine Scheinbewegung, weil sich das Objekt im ersten Augenblick exzentrisch abbildet. Sobald man durch Vorsetzen von Prismen die Ablenkung ausgleicht, verschwindet auch die Scheinbewegung. Statt Prismen vorzusetzen, kann man auch vor jedes Auge je eines von zwei gleich aussehenden Objekten anbringen, und das eine so lange verschieben, bis bei alternierendem Verdecken der Augen wiederum jede Scheinbewegung aufhört (Gaudenzi[307])). Die Untersuchung mittels Scheinbewegung ist theoretisch insofern die beste Methode, weil dabei ein Auge gar nichts sieht, also jedweder Einfluß vonseite seiner Netzhautbilder ausgeschlossen ist.

3. Maddox[331a, b]) läßt den zu Untersuchenden nach einer entfernten, auf gleichmäßigem Grunde befindlichen Kerzenflamme hinblicken und setzt vor ein Auge ein in einem kleinen Blechschirm (der das übrige Gesichtsfeld verdeckt) befestigtes zylindrisches Glasstäbchen mit horizontaler Achse. Durch dieses werden die von der Flamme ausgehenden Strahlen so gebrochen, daß auf der Netzhaut ein vertikaler Strich abgebildet wird. Bei Exo- oder Esophorie zieht der Strich neben der Flamme vorbei. Der Grad der Ablenkung kann an einer Landoltschen[4]) Tangentenskala direkt abgelesen werden. Zur Messung der Hyperphorie werden die Längsachse des Glasstäbchens und die Tangentenskala vertikal gestellt.

4. Seltener wird für die Untersuchung der Heterophorie die Farbenhaploskopie (vergl. oben S. 151) verwendet. Hering([196]), S. 234) suchte ein für diesen Zweck passendes rotes und grünes Papier auf folgende Weise aus: „Auf jedes Blatt einer Reihe ganz ebener grauer Blätter .... verschiedener Helligkeit werden ganz ebene Schnitzel von möglichst vielen, verschiedenen Sorten gesättigt roter und grüner Papiere gelegt und abwechselnd durch ein rotes und ein grünes Glas betrachtet. Man findet dann günstigenfalls ein graues Blatt, auf welchem durch das rote Glas ein bestimmtes rotes

und durch das grüne Glas ein bestimmtes grünes Schnitzel in derselben Farbe und Helligkeit erscheint wie der graue Grund, so daß man diese Schnitzel nur noch durch ihre Konturen bezw. ihr andersartiges Korn vom Grunde unterscheiden kann, und wenn man absichtlich nicht auf ihren Abstand akkommodiert, dieselben gar nicht bemerkt". Klebt man nun auf den grauen Grund je einen Streifen des roten und des grünen Papieres entweder (zum Nachweis der Hyperphorie) nebeneinander, oder (zum Nachweis der Eso- und Exophorie) vertikal übereinander, und hält vor ein Auge das rote, vor das andere das grüne Glas, so erscheinen bei Heterophorie die Streifen gegeneinander verschoben. Ein Phorometer nach dem ähnlichen Prinzip von d'Almeida (siehe oben S. 151) hat Williams[348]) konstruiert. Eine auf dem gleichen Prinzip beruhende Einrichtung von Snellen sowie andere Methoden siehe bei Landolt(4), S. 683 ff.). Über die Schwierigkeiten, welche der genauen Bestimmung des Betrages der Heterophorie entgegenstehen, vergl. man Bielschowsky und Ludwig[291]).

D. Geschwindigkeit und Bahn der Augenbewegungen.

Zur Untersuchung der Winkelgeschwindigkeit der Augenbewegungen sind in neuerer Zeit mehrere graphische Methoden angegeben worden. So setzte Orschansky[338]) auf den Bulbus (nach Kokaineinträufelung in den Bindehautsack) eine Kappe, bestehend aus einem künstlichen Glasauge mit zentralem Loch, befestigte daran einen Schreibhebel oder verzeichnete die Bewegungen auf photographischem Wege mittels eines Spiegels.*) Leider hat man gar keine Garantie dafür, daß die Kappe festsitzt und nicht rutscht. Besser dürfte es in dieser Beziehung mit einer Methode von Delabarre[295]) stehen, welche auch Huey[324a und b]) für seine Untersuchungen verwendete. Diese Autoren formten über einem künstlichen Auge oder über einer Glaskugel von gleicher Krümmung wie die Kornea eine Kappe aus Gips mit zentralem Loch, welche sich so fest an die Kornea ansaugt, daß ein Rutschen ausgeschlossen ist, solange der Gips nicht völlig von Tränenflüssigkeit durchtränkt ist (will man die Kappe vorher schon beseitigen, so überschwemmt man das Auge mit Flüssigkeit). Die Autoren verbanden nun diese Kappe mit einem Schreibhebel, bekamen aber stark durch Schleuderung entstellte Kurven. Zweifellos ist die (von Delabarre schon versuchte) photographische Registrierung mittels Spiegels vorzuziehen. Doch leidet die Methode auch dann noch an dem Übelstande, daß das Tragen der Kappe selbst am kokainisierten Auge etwas Ungewohntes ist. Die dadureh verursaehte Störung muß noeh verstärkt werden, wenn die Lider, wie dies Delabarre zur Verhinderung einer Verschiebung der Kappe tat, durch einen Lidhalter beiseite geschoben werden.

Frei von diesen Übelständen ist die von Dodge und Cline[298]) eingeführte Methode der photographischen Registrierung des Kornealspiegelbildchens eines stark leuchtenden Gegenstandes während der Augenbewegung. Die Autoren verwendeten zunächst das Spiegelbildchen eines schmalen, direkt

*) Über die photographischen Registriermethoden im allgemeinen siehe den 1. Band dieses Handbuchs. Ahrens[284]) hatte eine ähnliche Methode wie die von Orschansky bloß zur Beobachtung, nicht zur Registrierung der Augenbewegungen verwendet.

vom Sonnenlicht bestrahlten, weißen Kartonstreifens, das durch einen Spalt auf dem bewegten Film einer Kamera aufgenommen wurde. Später hat Dodge[299, 300]*) das Spiegelbildchen einer elektrischen Bogenlampe verwendet, deren Licht durch blaues Glas von den photographisch wenig wirksamen, aber die Versuchsperson belästigenden langwelligen Strahlen befreit war. Außerdem wurden die Bilder vergrößert aufgenommen, weil sonst die Exkursionen zu klein werden. Koch[326]) photographierte, ebenfalls unter Vergrößerung, das Spiegelbildchen der Glühstäbchen einer Nernstlampe auf bewegtem Negativpapier. In seiner Anordnung wurden die Kornealspiegelbilder beider Augen, eines über dem andern, mit Hilfe zweier mit Objektiven versehenen Röhren auf dem Negativpapier entworfen und demnach die Bewegungen beider Augen zugleich aufgenommen. In der Mitte zwischen den beiden Röhren und den Augen der Versuchsperson wurde ein schmales Spiegelglas angebracht, welches den Augen die Fixationsmarken darbot, zwischen denen sich die Bewegungen (parallele Seitenwendung, Hebung, Senkung) vollzogen. Zur Ausführung von Konvergenzbewegungen dienten andere, seitliche Marken. Eine gewisse theoretische Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt in der Ableitung der Winkelgeschwindigkeit aus der Bewegung des Kornealspiegelbildchens, welch letztere dadurch bedingt ist, daß der Augendrehpunkt nicht mit dem Krümmungsmittelpunkt der spiegelnden Fläche zusammenfällt. Doch hat Dodge([299]), S. 81 ff.) eine mathematische Theorie der Bewegung des Kornealspiegelbildchens und eine empirische Bestätigung derselben gegeben.

Ein anderes Verfahren, mittels welchen man sowohl die Winkelgeschwindigkeit, als auch die Bahn der Augenbewegungen verfolgen kann, welches aber vorwiegend zum Studium der Bewegungsbahn verwendet worden ist, wurde von Judd, Mc Allister und Steele[325]) angegeben.

Diese Autoren photographierten die Bewegungen einer auf die Kornea aufgesetzten weißen Marke mittels einer Kinematographenkamera.

Die weiße Marke stellen sie folgendermaßen her: Auf eine mit geschmolzenem Paraffin überzogene Glasplatte wird eine dünne Schicht in Wasser suspendierten Zinkweißes (Chinese white) ausgegossen. Die Flüssigkeit soll eine etwas größere Konsistenz besitzen als bei ihrer Benutzung als gewöhnliche weiße Tinte. Nach dem Eintrocknen wird die Schicht in ganz kleine Stückchen zerschnitten. Um die Partikel für Wasser undurchlässig zu machen, taucht man sie in geschmolzenes Paraffin und entfernt das überschüssige Paraffin durch Wegstreichen über eine reine warme Glasplatte. Ein solches Stückchen wird auf die Hornhaut gebracht und dort durch Verschieben des Unterlides mit dem Finger an eine bestimmte Stelle gerückt, am besten etwas unterhalb und nasalwärts von der Pupille. Dort wird es beim gewöhnlichen Blinzeln nicht verrückt. Es sitzt fest auf der Oberfläche des nicht kokainisierten Bulbus und verursacht auch dann keine Beschwerden, wenn es unter die Lider gerät.

Die Aufnahmen — das ist die zweite Neuerung — erfolgten nach der kinematographischen Methode: sehr rasch aufeinander folgende Momentaufnahmen von 50—70 σ Expositionsdauer und zwischengeschalteten Pausen. Um auch die Augenstellung während der Pausen zwischen zwei Aufnahmen zu fixieren, wurden in einer weiteren Anordnung zwei Kameras verwendet, welche alternierend Aufnahmen machten, derart, daß immer schon zum Schluß der Expositionszeit der einen die andere zur Exposition geöffnet wurde, so daß sich die Aufnahmen teilweise deckten.

Sehr zu beachten sind bei solchen Aufnahmen die kleinen Kopfbewegungen, welche trotz aller Fixierungsvorrichtungen bestehen bleiben (siehe

*) In diesen Artikeln findet man eine genaue Beschreibung der Versuchsanordnung.

oben S. 116 Anm.). Judd, Mc Allister und Steele setzten deshalb den Versuchspersonen ein Brillengestell auf, an welchem kleine glänzende Metallkügelchen angebracht waren, und maßen die Verschiebungen des weißen Flecks am Auge gegenüber der Lage der weißen Pünktchen, welche von den Reflexen an den Metallkügelchen herrührten. Dodge[299]) akzeptierte diese Methode auch für seine Aufnahmen, und ließ also auf der bewegten Platte zwei Kurven schreiben: eine vom Kornealspiegelbildchen, die andere vom Brillenreflex.

Photographische Aufnahmen der Bewegungsbahn der Augen können auch mit ruhender Platte gemacht werden. Eine solche Versuchsanordnung hat zuerst Stratton([343]); die in Nr. [344]) eingeführten Änderungen sind gering) unter Benutzung des Kornealspiegelbildchens einer Bogenlampe ausgearbeitet, und auch Dodge[299]) hat dieselbe Methode verwendet. Es ist dabei zu beachten, daß durch passend angebrachte Schirme sonstige störende Reflexe an der Oberfläche der Konjunktiva abgeblendet werden.

Diesen objektiven Untersuchungsmethoden gegenüber dürften wohl die älteren subjektiven Bestimmungsmethoden in den Hintergrund treten. Ich führe als die wichtigsten an: Für die Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Augenbewegungen die Methode von Lamansky[329]), welche hauptsächlich von Brückner[293]) weiter ausgebildet wurde. Dabei wird die Geschwindigkeit bestimmt aus der Zahl der gesonderten Nachbilder, welche man wahrnimmt, wenn man während der Ausführung einer bestimmten Bewegung in bekannten gleichen Zeitintervallen rasch aufeinander folgende Lichtreize auf das Auge einwirken läßt. Lamansky benutzte als intermittierenden Lichtreiz das durch einen rotierenden Episkotister betrachtete Spiegelbild einer kleinen Flamme, Brückner die Funken der sekundären Spirale eines Ruhmkorff.

Eine zweite subjektive Methode zur Messung der Geschwindigkeit der Augenbewegungen rührt von Guillery[309], [310]) her. Vor einer durch eine Milchglasglocke gedeckten Lampe stand ein Episkotister mit 4 einander paarweise diametral gegenüberstehenden schmalen sektorenförmigen Schlitzen. Vor dem Episkotister befand sich ein schwarzer Schirm und in dessen Mitte ein drehbarer Spalt von 23 mm Länge und 0,5 mm Breite, der zunächst vertikal eingestellt wurde. Der Schirm war so angebracht, daß der Spalt sich auf der rechten Seite der Episkotisterscheibe befand, und daß seine Mitte der Höhe der Drehungsachse des Episkotisters entsprach. Wenn sich der Episkotister drehte, wurde demnach der Spalt beim Passieren jedes Episkotisterschlitzes in einer bestimmten Richtung (von oben nach unten) sukzessive von hinten her durchleuchtet. Führte das Auge gleichzeitig eine Bewegung in horizontaler Richtung aus, so mußte infolge der Nachdauer der Netzhauterregung der vertikale Spalt als leuchtende schräge Linie erscheinen. Der Grad der scheinbaren Neigung ließ sich wegen der kurzen Dauer der Nacherregung nicht unmittelbar messen, wohl aber konnte man den Spalt so weit nach der seiner scheinbaren Neigung entgegengesetzten Seite drehen, daß er bei der betreffenden Augenbewegung vertikal erschien.

Die erste subjektive Methode zur Bestimmung der Bewegungsbahn war die von Wundt[350]), der im Gesichtsfeld eine Anzahl von Merkstellen

(Buchstaben, Zahlen) gleichmäßig verteilte, und die Bahn der Gesichtslinie aus jenen einzelnen Merkpunkten zusammensetzte, welche bei der Ausführung der Bewegung deutlich gesehen wurden, über welche also die Gesichtslinie beim Übergang von der Fixation eines Punktes zum anderen hinwegstrich.

Andere versuchten die Bewegungsbahn aus der intensiven Nachbildspur eines sehr hellen Lichtpunktes zu bestimmen. So hat Ahlström[283]), ohne auf die schweren, tagelang anhaltenden Blendungssymptome Rücksicht zu nehmen, während der Ausführung einer Bewegung das Licht einer Bogenlampe durch eine kreisrunde Öffnung von 2 mm Durchmesser, welche sich 10 cm vor der Pupille befand, ins Auge fallen lassen. Manche Personen können aber mit schwächerem Licht auskommen. So konnte vorher schon Herz[317]) ganz analoge Versuche mit dem Licht einer Petroleumlampe (nach seiner Zeichnung) ausführen.

E. Bestimmung der Blickfeldgrenzen. Wirkung der einzelnen Augenmuskeln.

Zur Bestimmung der Grenzen des monokularen Blickfeldes wurden von Snellen und Landolt([5]), S. 232) und von Schneller[340]) vor fixiertem Kopfe am Perimeter (oder an einer vertikal gestellten Tafel) feinste nur im direkten Sehen leserliche Schriftproben soweit nach der Peripherie verschoben, bis das denselben folgende Auge sie nicht mehr zu erkennen vermochte. Zweckmäßiger ist es nach Hering([312]), S. 44; R. S. 444), in dem zu untersuchenden Auge ein zentrales Nachbild zu erzeugen und auf einer frontalparallelen Ebene die Grenzen zu markieren, bis zu welchen das Nachbild bei maximaler Exkursion des Blickes verschoben erscheint.

Hering stellte vor dem in der Primärlage fixierten Kopfe eine frontalparallele Glasplatte auf, auf welcher mit Tusche oder Ölfarbe die beiden Punkte markiert waren, in denen die in Primärstellung befindlichen Gesichtslinien die Glastafel durchschnitten. „Hinter der Glastafel ist auf einem farbigen Grunde eine zum Grund ungefähr komplementär gefärbte kleine Scheibe oder Oblate angebracht, für Normalsichtige an einer möglichst weit entfernten Wand, für Kurzsichtige im Fernpunkte ihrer Augen.“ Von der Scheibe erzeugt man sich ein dauerhaftes Nachbild, läßt dann den Blick auf der fernen Wand bis zur Grenze der Exkursionsfähigkeit wandern und markiert auf der Glastafel den Punkt, in welchem sie nunmehr von der Gesichtslinie durchschnitten wird. Asher[286]) stellte statt der Glasplatte im Fernpunkte seiner myopischen Augen direkt einen vertikalen, mit Papier überzogenen Schirm auf, auf welchem die Blickfeldgrenzen verzeichnet wurden.

Mit Hilfe dieser Methoden kann aber die Exkursionsfähigkeit der Augen noch nicht ohne weiteres nach allen Seiten bestimmt werden, weil z. B. nach der medialen Seite zu die Nase in den Spielraum der Blicklinie hereinragt. Um auch für diese Partien die Grenzen der Exkursionsfähigkeit festzustellen, setzte Schneller[340]) vor das Auge Prismen mit nasalwärts bezw. nach unten gerichteter brechender Kante, Hornemann[323]) brachte einen schmalen Spiegel an. Eine objektive Bestimmung der Exkursionsfähigkeit des Bulbus nach einwärts führten Donders und Schuurmann aus, deren Methode ich nach der Beschreibung von Snellen und Landolt([5]), S. 233) wiedergebe:

„Der Kopf wird in den Ausschnitt eines horizontalen Brettes A B (Fig. 54) gebracht. Zu seinen beiden Seiten befinden sich daran zwei senkrecht auf

die Länge des Brettes und in einer Linie liegende kleine Fernröhren D D, welche auf die Kornealscheitel beider Augen eingestellt sein müssen, wenn die Verbindungslinie der Drehpunkte senkrecht zur Achse des Brettes steht. Das zu messende Auge A befindet sich in der Mitte zwischen den beiden Fernröhren und im Mittelpunkte eines graduierten Halbkreises. Ihm gegenüber in B steht das Ophthalmometer und seitwärts vom Auge eine Flamme F, welche dasselbe beleuchtet."

„Man weist nun den zu Untersuchenden an, soviel wie möglich zur Seite zu sehen, und stellt dann eine zweite Flamme E so, daß ihr Reflexbild, durch das Fernrohr des Ophthalmometers gesehen, gerade auf dem Kornealrande erscheint. Behufs größerer Genauigkeit kann man auch durch Drehung der Ophthalmometerplatten das Reflexbild, das man in der Nähe des Kornealrandes entstehen läßt, so weit verdoppeln, daß das eine der beiden

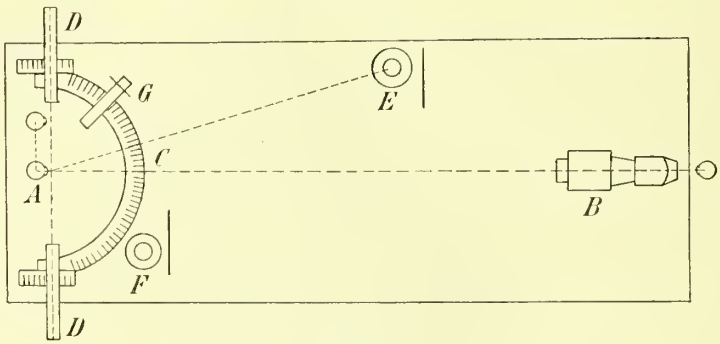


Fig. 54.
Nach Snellen und Landolt(5), S. 233).

Bilder gerade auf das andere Doppelbild des Kornealrandes fällt. Hierauf läßt man das Auge bei leichter Drehung des Kopfes um seine vertikale Achse, einem Objekte G folgen, das man soweit auf dem Gradbogen verschiebt, bis die Kornealreflexbilder im Ophthalmometer wieder die gleiche Stellung haben wie vorher. Dann gibt die Stellung des Objektes den Grad der maximalen Exkursion an, welche das Auge beim ersten Versuche gemacht hatte."

Die Grenze des beiden Augen gemeinsamen binokularen Blickfeldes wird bestimmt durch die Stellen, an welchen ein kleines binokular gesehenes Objekt eben noch einfach gesehen wird und noch nicht in Doppelbilder zerfällt. Über die Fehlerquellen bei diesen Bestimmungen siehe W. Asher(286), S. 329).

Die Grenzbestimmung des monokularen und binokularen Blickfeldes ist von Wichtigkeit für die physiologische Untersuchung der Leistung der einzelnen Augenmuskeln,*) insofern als aus dem Ausfall, welchen die isolierte frische Lähmung eines Muskels bewirkt, ein Rückschluß auf den Anteil des betreffenden Muskels an der Ausführung bestimmter Bewegungen gezogen werden kann. Bezüglich der Vorsichtsmaßregeln, welche bei solchen Unter-

*) Eine Besprechung der rein anatomischen Methodik der Bestimmung der Insertionsverhältnisse und des Verlaufs der Augenmuskeln gehört nicht zu unserer Aufgabe.

suchungen einzuhalten sind, und detaillierterer Anordnungen verweise ich auf die Abhandlungen von Schneller[340]) und Bielschowsky[290]).

Über gewisse Fragen der Augenmuskelinnervation kann auch die Auskultation der Muskelgeräusche des Auges mit einem kleinen Stethoskop nach Hering[313]) Aufschluß geben. Auf die leicht geschlossenen Lider oder direkt auf den kokainisierten Bulbus wird ein kleines Hartgummitrichterchen von cca. 8 mm größtem Durchmesser aufgesetzt und durch einen Kautschukschlauch mit einem durchbohrten Nüßchen verbunden, welches ins Ohr gesteckt wird.

Zur Demonstration der Wirkung der einzelnen Augenmuskeln sind mehrfach Modelle konstruiert worden, sogen. Ophthalmotrope. Literatur über derartige Schemata und Ophthalmotrope, worunter auch solche zur Demonstration des Listingschen Gesetzes (siehe oben S. 192 Anm.) bei Zoth(8), S. 304ff.)

Literaturverzeichnis.

I. Allgemeine Werke.

Helmholtz, Optik und Hering, Raumsinn, siehe Einleitung!

1) H. Aubert, Physiologie der Netzhaut. Morgenstern, Breslau, 1865.

2) B. Bourdon, La perception visuelle de l'espace. Paris, Schleicher frères, 1902.

3) E. Hering, Beiträge zur Physiologie, 5 Hefte. Leipzig, Engelmann 1861—1864.

4) E. Landolt, Artikel „Die Untersuchungsmethoden" in Graefe-Saemischs Handbuch d. Augenheilk. 2. Aufl. 4. Bd. 1. Abt. 1904.

5) Snellen und E. Landolt, Dass. Ebenda. 1. Aufl. Bd. 3. Teil 1, 1874.

6) A. W. Volkmann, Physiol. Untersuchungen im Gebiete der Optik. Leipzig, Breitkopf & Härtel, 1864.

7) W. Wundt, Grundzüge der physiologischen Physiologie, Leipzig, Engelmann. Bd. II, zitiert nach der 5. Auflage, 1902.

8) O. Zoth, Augenbewegungen und Gesichtswahrnehmungen. Nagels Handb. d. Physiol. Bd. 3, 1905.

II. Untersuchung der Sehschärfe

(Auflösungsvermögen und Empfindlichkeit für Lagenunterschiede im ebenen Sehfelde).

9) L. Asher, Über das Grenzgebiet des Licht- und Raumsinnes. Z. f. Biologie Bd. 35, S. 394, 1897.

10) Aubert und Förster, Beiträge zur Kenntnis des indirekten Sehens. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 3, Abt. 2, S. 1, 1857.

11) F. Best, Über die Grenze der Erkennbarkeit von Lagenunterschieden. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 51, S. 453, 1900.

12) S. Bloom und S. Garten, Vergleichende Untersuchungen über die Sehschärfe des hell- und des dunkeladaptierten Auges. Pflügers Archiv Bd. 72, S. 372, 1898.

13) C. du Bois-Reymond, Scheinheit und kleinster Sehwinkel. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 32, Abt. 3, S. 1, 1886.

14) A. Boltunow, Über die Sehschärfe im farbigen Licht. Zeitschr. f. Psychol. Bd. 42. 2. Abt. S. 359, 1908.

15) A. Borschke, Untersuchungen über die Herabsetzung der Sehschärfe durch Blendung. Z. f. Psychologie, Bd. 34, S. 1, 1904.

16) A. Borschke, Über die Ursache der Herabsetzung der Sehleistung durch Blendung. Ebenda Bd. 35, S. 161, 1904.

17) A. Broca, Variation de l'acuité visuelle avec l'éclairage et l'adaptation. Compt. rend. de l'Acad. Bd. 132, S. 653, 1901.

18) H. Buttmann, Untersuchungen über Sehschärfe. Inaug.-Dissert. Freiburg 1896. Zitiert nach Hermanns Jahresber. 1896.

19) A. Charpentier, Nouvelles recherches sur la sensibilité de la rétine. Arch. d'Ophth. 2, S. 234, 1882.

20) Ders. Description d'un photoptomètre différentiel. Ebenda, S. 418, 1882.

21) Expériences relatives à l'influence de l'éclairage sur l'acuité visuelle. Ebenda, 3, S. 37, 1883.

22) H. Cohn, Untersuchungen über die Sehschärfe bei abnehmender Beleuchtung. Arch. f. Augenheilk. Bd. 13, S. 223, 1884.

23) Ders. Einige Versuche über die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Helligkeit. Ebenda, Bd. 31, Ergänz.-Heft, S. 195, 1895.

24) Ders. Untersuchungen über die Sehleistungen der Ägypter. Berliner klin. Woch. 1898, S. 453.

25) J. R. Depène, Experimentelle Untersuchungen über den Einfluß seitlicher Blendung auf die zentrale Sehschärfe. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. Bd. 38, S. 289, 1900.

26) S. Exner, Studien auf dem Grenzgebiete des lokalisierten Sehens. Pflügers Arch. Bd. 73, S. 117, 1898.

27) H. Feilchenfeld, Über die Sehschärfe im Flimmerlicht. Z. f. Psychol. Bd. 35, S. 1, 1904.

28) E. Fick, Über Stäbchensehschärfe und Zapfensehschärfe. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 45, Abt. 2, S. 336, 1898.

29) S. Garten, Antwort auf die Bemerkung des H. Prof. Nagel etc. Arch. f. Augenheilk. Bd. 44, S. 358, 1901.

30) Groenouw, Über die Sehschärfe der Netzhautperipherie und eine neue Untersuchungsmethode derselben. Arch. f. Augenheilk. Bd. 26, S. 85, 1893.

31) Guillery, Ein Vorschlag zur Vereinfachung der Sehproben. Arch. f. Augenheilk. Bd. 23, S. 323, 1891.

32) Ders. Einiges über den Formensinn. Ebenda, Bd. 28, S. 263, 1894.

33) Ders. Über die räumlichen Beziehungen zwischen Licht- und Farbensinn. Ebenda, Bd. 31, S. 204, 1895.

34) Ders. Vergleichende Untersuchungen über den Raum-, Licht- und Farbensinn im Zentrum und Peripherie der Netzhaut. Z. f. Psychol. Bd. 12, S. 243, 1896.

35) Ders. Weitere Untersuchungen über den Lichtsinn. Ebenda, Bd. 13, S. 187, 1897.

36) Ders. Über die Empfindungskreise der Netzhaut. Pflügers Arch. Bd. 68, S. 120, 1897.

37) Ders. Weitere Untersuchungen zur Physiologie des Formensinnes. Arch. f. Augenheilk. Bd. 51, S. 209, 1905.

38) Ders. Zur Erörterung der Sehschärfeprüfung. Ebenda, Bd. 53, S. 148, 1905.

39) Ders. Kritische Bemerkungen zu einigen neueren Arbeiten über die Sehschärfeprüfung. Ebenda, Bd. 57, S. 1, 1907.

40) V. Hensen, Über das Sehen in der fovea centralis. Virchows Archiv, Bd. 39, S. 475, 1867.

41) E. Hering, Über Irradiation. Hermanns Handbuch d. Physiol. Bd. 3, 2. Abt. S. 440, 1880.

42) Ders. Über die Grenzen der Sehschärfe. Berichte d. math.-phys. Klasse sächs. Ges. d. Wiss. Bd. 51, S. 16, 1899.

43) Ders. Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. Graefe-Saemischs Handbuch d. Augenheilk. 2. Aufl. Bd. 3, Kap. XII.

44) E. Hummelsheim, Über den Einfluß der Pupillenweite auf die Sehschärfe bei verschiedener Intensität der Beleuchtung. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 45, S. 357, 1898.

45) W. Koster, Über die Bestimmung der Sehschärfe nach den Methoden von Landolt und von Guillery. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 64, S. 128, 1906.

46) Ladd-Franklin und Guttmann, Über das Sehen durch Schleier. Z. f. Psychol. Bd. 31, S. 248, 1903.

47) E. Landolt, Die Reform der Bestimmung der Sehschärfe. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 64, S. 598, 1906.

48) Ders. Formensinn und Sehschärfe. Arch. f. Augenheilk. Bd. 55, S. 219. 1906.

49) L. Loeser, Das Verhalten der Sehschärfe in farbigem Licht. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 69, S. 479, 1909.

50) H. P. O. Orum, Studien über die elementaren Endorgane für die Farbenempfindung. Skandin. Arch. f. Physiol. Bd. 16, S. 1, 1904.

51) Ch. Oguchi, Experimentelle Studien über die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität etc. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 66, S. 455, 1907.

52) E. Pergens, Über Faktoren, welche das Erkennen von Sehproben beeinflussen. Arch. f. Augenheilk. Bd. 43, S. 144, 1901.

53) Ders. Untersuchungen über das Sehen. Z. f. Augenheilk. Bd. 9, S. 256, 1903.

54) Ders. Über das Erkennen von C-Figuren bei verschiedenen Durchmessern und konstanter Öffnung. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1903, II, S. 112.

54a) Recherches sur l'acuité visuelle. Ann. d'Oculist. Bd. 135, 136 und 137.

55) A. Posch, Über Sehschärfe und Beleuchtung. Arch. f. Augenheilk. Bd. 5, S. 14, 1876.

56) A. Riccò, Relazione fra il minimo angolo visuale e l'intensità luminosa. Ann. di Ottalm. Bd. 6, S. 373, 1877.

57) I. Silfvast, Über die Sehschärfe für verschiedene Farben im Zentrum der Retina. Skand. Arch. f. Physiol. Bd. 20. S. 411, 1908.

58) Snellen, Echelle typographique, pour mesurer l'acuité de la vision. Utrecht, 1862.

59) G. M. Stratton, A new determination of the minimum visible and its bearing on localization and binocular depth. Psychol. Review, Bd. 7, S. 429, 1900.

60) W. Uhthoff, Über das Abhängigkeitsverhältnis der Sehschärfe von der Beleuchtungsintensität. Graefes Arch., Bd. 32, Abt. 1, S. 171, 1886.

61) Ders. Weitere Untersuchungen über die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Intensität sowie von der Wellenlänge. Ebenda, Bd. 36, Abt. 1, S. 33, 1890.

62) Ders. Über die kleinsten wahrnehmbaren Gesichtswinkel in den verschiedenen Teilen des Spektrums. Z. f. Psychol. Bd. 1, S. 155, 1890.

63) F. Wächter, Über die Grenzen des telestereoskopischen Sehens. Wiener Sitzgsber. Bd. 105, Abt. 2a, S. 856, 1896.

64) Th. Wertheim, Über die indirekte Sehschärfe. Z. f. Psychol. Bd. 7, S. 172. 1894.

65) S. A. Wülfing, Über den kleinsten Gesichtswinkel. Z. f. Biologie, Bd. 29, S. 199. 1893.

III. Lokalisation im ebenen Sehfelde bei Ausschluß von optischen Nebenreizen.

66) H. Aubert, Eine scheinbar bedeutende Drehung von Objekten bei Neigung des Kopfes nach rechts oder links. Virchows Arch. Bd. 20, S. 381, 1861.

67) Berthold, Über die Bewegungen des kurzsichtigen Auges. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 11, Abt. 3, S. 107, 1865.

68) W. Bihler, Beiträge zur Lehre vom Augenmaß für Winkel. Dissert. Freiburg. 1896. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 14, S. 391.

69) B. Bourdon, La sensibilité musculaire des yeux. Rev. philos. 44 (10) S. 413, 1897. Zit. nach Z. f. Psychol. Bd. 19, S. 333.

70) Ders. Les objets paraissent-ils se rapetisser en s'élevant au-dessus de l'horizon? Année psychol. Bd. 5, S. 55, 1899. Zit. nach Bourdon (2), S. 419.)

71) Darwin and Rivers, A method of measuring a visual illusion. Journ. of Physiol. Bd. 28, p. XI, 1902.

72a) R. Fischer, Größenschätzungen im Sehfelde. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 37, Abt. 1, S. 97, 1891.

72b) Ders. Weitere Größenschätzungen im Sehfelde. Ebenda Bd. 37, Abt. 3. S. 55. 1891.

73) Guillery, Über das Augenmaß der seitlichen Netzhautteile. Z. f. Psychol. Bd. 10. S. 83, 1896.

74) Guillery, Messende Untersuchungen über den Formensinn. Pflügers Arch. Bd. 75, S. 466, 1899.

75) A. Guttmann, Blickrichtung und Größenschätzung. Z. f. Psychol. Bd. 32, S. 333, 1903.

76) G. D. Hicks and W. Rivers, The illusion of compared horizontal and vertical lines. Brit. Journ. Psychol. Bd. 2, S. 244, 1908. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 48, I. Abt. S. 305.

77) H. Higier, Experim. Prüfung der psychophysischen Methoden im Bereiche des Raumsinnes der Netzhaut. Wundts Philos. Stud. Bd. 7, S. 232, 1892.

78) J. Jastrow, On the judgment of angles and positions of lines. Amer. Journ. of Psychol. Bd. 5, S. 214, 1893.

79) J. von Kries, Beiträge zur Lehre vom Augenmaß. Beitr. z. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. Festschr. f. Helmholtz. 1891.

80) A. Kundt, Untersuchungen über Augenmaß und optische Täuschungen. Poggendorffs Annalen, Bd. 120, S. 118, 1863.

81) F. Küster, Die Direktionskreise des Blickfeldes. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 22, Abt. 1, S. 149, 1876.

82) R. Mac Dougall, The subjective horizon. Psych. Rev. Mon. Suppl. 4. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 33, S. 382. Kurze Bemerkungen darüber auch in Amer. Journ. of Physiol. Bd. 9, S. 122, 1903.

83) E. Mach, Über das Sehen von Lagen und Winkeln durch die Bewegung des Auges. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Klasse. Bd. 43, Abt. 2, S. 215, 1861.

84) J. Merkel, Die Methode der mittleren Fehler etc. Wundts Philos. Stud. Bd. 9, S. 400, 1894.

85) C. B. Morrey, Die Präzision der Blickbewegung und der Lokalisation an der Netzhautperipherie. Z. f. Psychol. Bd. 20, S. 317, 1899.

86) M. E. Mulder, Ons ordeel over vertikal, bij neiging van het hoofd naar rechts of links. Feestbundel a. F. C. Donders. Amsterdam. Zitiert nach Nagel (89).

87) A. Müller, Über den Einfluß der Blickrichtung auf die Gestalt des Himmelsgewölbes. Z. f. Psychol. Bd. 40, S. 74, 1906.

88) H. Münsterberg, Augenmaß. Beitr. z. exp. Psychol. Heft 2, S. 125, 1889. Mohr. Freiburg.

89) W. A. Nagel, Über das Aubertsche Phänomen und verwandte Täuschungen über die vertikale Richtung. Z. f. Psychol. Bd. 16, S. 373. 1898.

90) B. O. Peirce, The perception of horizontal and of vertical lines. Science, n. s., vol. 10, S. 425, 1899.

91) F. v. Recklinghausen, Netzhautfunktionen. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 5, Abt. 2, S. 127, 1859.

92) Reddingius, Eine Anpassung. Z. f. Psychol. Bd. 22, S. 96, 1899.

93) J. Richter und H. Wamser, Experimentelle Untersuchung der beim Nachzeichnen von Strecken und Winkeln entstehenden Größenfehler. Z. f. Psychol. Bd. 35, S. 321, 1904.

94) M. Sachs und J. Meller, Über die optische Orientierung bei Neigung des Kopfes gegen die Schulter. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 52, S. 387, 1901.

95) Dieselben. Untersuchungen über die optische und haptische Lokalisation bei Neigungen um eine sagittale Achse. Z. f. Psychol. Bd. 31, S. 89, 1903.

96) M. Sachs und R. Wlassak, Die optische Lokalisation der Medianebene. Z. f. Psychol. Bd. 22, S. 23, 1899.

97) R. Seyfert, Über die Auffassung einfachster Raumformen. Wundts philosoph. Studien, Bd. 14, S. 550, 1898.

98a) G. M. Stratton, Some preliminary experiments on vision without inversion of the retinal image. Psychol. Review Bd. 3, S. 611, 1896.

98b) Ders. Vision without inversion of the retinal image. Ebenda, Bd. 4, S. 341, 1897.

98c) Ders. The spatial harmony of touch and sight. Mind, n. s., Bd. 8, S. 492, 1899. Ref. Z. f. Psychol. Bd. 23, S. 139.

99) Stroobant, Sur l'agrandissement apparent des constellations, du soleil et de la lune à l'horizon. Bullet. Acad. Royale de Belgique 3. Série 1884, t. 8, p. 719 und t. 10, p. 315, 1885. Zit. nach Bourdon (2), S. 415).

100) A. v. Tschermak, Über die absolute Lokalisation bei Schielenden. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 55, S. 1, 1902.

101) Ders. Beschreibung einiger Apparate etc. Pflügers Arch. Bd. 119, S. 29, 1907.

102a) A. W. Volkmann, Über einige Gesichtsphänomene, welche mit dem Vorhandensein eines unempfindlichen Flecks im Auge zusammenhängen. Sitzgsber. sächs. Ges. d. Wiss. Math.-phys. Klasse, 1853, S. 27.

102b) Ders. Über das Vermögen, Größenverhältnisse zu schätzen. Ebenda, Bd. 10, S. 173, 1858.

103) St. Witasek, Versuche über das Vergleichen von Winkelverschiedenheiten. Z. f. Psychol. Bd. 11, S. 321, 1896.

104) v. Wittich, Studien über den blinden Fleck. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 9, Abt. 3, S. 1, 1863.

105) O. Zoth, Über den Einfluß der Blickrichtung auf die scheinbare Größe der Gestirne und die scheinbare Form des Himmelsgewölbes. Pflügers Arch. Bd. 78, S. 363, 1899.

IV. Einfluß von optischen Nebenreizungen auf die Lokalisierung von Richtungen und auf die Schätzung von Längen.

106) J. M. Baldwin, The effect of size-contrast upon judgments of position in the retinal field. Psychol. Rev. Bd. 2, S. 244, 1895.

107) V. Benussi, Über den Einfluß der Farbe auf die Größe der Zöllnerschen Täuschung. Z. f. Psychol. Bd. 29, S. 264 und 385, 1902.

108) Benussi-Liel, Die verschobene Schachbrett-Figur. Meinongs Unters. z. Gegenstandstheorie und Psychol. VI. Zitiert n. Z. f. Psychol. 41, I, S. 201.

109) V. Berrettoni, Illusioni ottico-geometriche. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 45, I, S. 284, 1907.

110) M. Blix, Die sogen. Poggendorffsche optische Täuschung. Skandinav. Arch. f. Physiol. Bd. 13, S. 193, 1902.

111) Botti, Beitrag zur Kenntnis der variablen geometrisch-optischen Streckentäuschungen. Arch. f. d. ges. Psychol. Bd. 6, S. 306, 1906.

112) F. Brentano, Über ein optisches Paradoxon. Z. f. Psychol. Bd. 3, S. 349, 1892.

113) Ders. Zur Lehre von den optischen Täuschungen. Ebenda, Bd. 6, S. 1, 1893.

114) E. Burmester, Beitrag zur experimentellen Bestimmung geometrisch-optischer Täuschungen. Z. f. Psychol. Bd. 12, S. 355, 1896.

115) Delboeuf, Une nouvelle illusion d'optique. Rev. scientif. Bd. 51, S. 236, 1893.

116) Einthoven, Eine einfache physiologische Erklärung für verschiedene geometrisch-optische Täuschungen. Pflügers Arch. Bd. 71, S. 1, 1898.

117) G. Heymans, Quantitative Untersuchungen über das „optische Paradoxon". Z. f. Psychol. Bd. 9, S. 221, 1896.

118) Ders. Quantitative Untersuchungen über die Zöllnersche und die Loebsche Täuschung. Z. f. Psychol. Bd. 14, S. 101, 1897.

119) P. Hoefer, Beitrag zur Lehre vom Augenmaß bei zweiäugigem und bei einäugigem Sehen. Pflügers Archiv Bd. 115, S. 483, 1906.

120) F. B. Hofmann, und A. Bielschowsky, Über die Einstellung der scheinbaren Horizontalen und Vertikalen etc. Pflügers Arch. Bd. 126, S. 453, 1909.

121) Jastrow, A study of Zoellner's figures and other related illusions. Amer. Journ. of Psychol. Bd. 4, S. 381, 1892.

122) Ch. H. Judd, A study of geometrical illusions. Psychol. Review, Bd. 6, S. 241, 1899.

123) F. Kiesow, Über einige geometrisch-optische Täuschungen. Arch. f. d. ges. Psychol. Bd. 6, S. 289, 1906.

124) H. W. Knox, On the quantitative determination of an optical illusion. Amer. Journ. Psychol. Bd. 6, S. 413, 1893.

125) W. Laska, Über einige optische Urteilstäuschungen. Du Bois' Arch. f. Physiol. 1890, S. 326.

126) A. Lehmann, Irradiation als Ursache geometrisch-optischer Täuschungen. Pflügers Arch. Bd. 103, S. 84, 1904.

127) Th. Lipps, Raumästhetik und geometrisch-optische Täuschungen. Leipzig Barth. 1897.

128) J. Loeb, Über den Nachweis von Kontrasterscheinungen im Gebiete der Raumempfindungen des Auges. Pflügers Arch. Bd. 60, S. 509, 1895.

129) F. C. Müller-Lyer, Optische Urteilstäuschungen. Du Bois' Arch. f. Physiol. 1889, Suppl. S. 263.

130) Ders. Zur Lehre von den optischen Urteilstäuschungen etc. Z. f. Psychol, Bd. 9, S. 1, und Bd. 10, S. 421, 1896.

131) H. Münsterberg, Die verschobene Schachbrettfigur. Z. f. Psychol. Bd. 15, S. 184, 1897.

132) I. I. Oppel, Über geometrisch-optische Täuschungen. Jahresber. d. physik. Vereins Frankfurt/Main 1854/55, S. 37.

133a und b) Ders. Nachlese zu den geom.-opt. Täuschungen. Ebenda 1856/57, S. 47 und 1860/61 S. 26.

134) H. I. Pearce, The law of attraction in relation to some visual and tactual illusions. Psycholog. Review Bd. 11, S. 143, 1904.

135) A. H. Pierce, The illusion of the Kindergarten patterns. Psychol. Rev. 5, S. 233, 1898. Wieder abgedruckt in [137]).

136) Ders. A new explanation for the illusory movements etc. Ebenda 7, S. 356, 1900. Wieder abgedruckt in [137]).

137) Ders. Studies in auditory and visual space perception. New-York, Longmans, Green Co. 1901.

138) F. Schumann, Beiträge zur Analyse der Gesichtswahrnehmungen. Z. f. Psych. Bd. 23, S. 1; Bd. 24, S. 1; Bd. 30, S. 241; Bd. 36, S. 61.

139) A. Thiéry, Über geometrisch-optische Täuschungen. Wundts Philosoph. Studien, Bd. 11, S. 307 und 603, und Bd. 12, S. 67, 1895.

140) R. Watanabe, On the quantitative determination of an optical illusion. Amer. Journ. Psychol., 6, S. 509, 1893.

141) St. Witasek, Über die Natur der geometrisch-optischen Täuschungen. Z. f. Psychol. Bd. 19, S. 81, 1899.

142) W. Wundt, Die geometrisch-optischen Täuschungen. Abhandl. sächs. Ges. d. Wiss., math.-phys. Klasse, Bd. 26, S. 55, 1898.

143) F. Zöllner, Über eine neue Art von Pseudoskopie etc. Poggendorffs Annalen Bd. 110, S. 500, 1860.

144) Ders. Über die Abhängigkeit der pseudoskopischen Ablenkung paralleler Linien vom Neigungswinkel der sie durchschneidenden Linien. Ebenda, Bd. 114, S. 587, 1861.

V. Korrespondenz der Höhen- und Breitenwerte beider Netzhäute.

145) A. Bielschowsky, Untersuchungen über das Sehen der Schielenden. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 50, S. 406, 1900.

146) B. Bourdon, La distinction locale des sensations correspondantes des deux yeux. Bull. Soc. scientif. et médic. de l'ouest Bd. 9, 1900, zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 29, S. 225.

147) Ders. Sur la distinction des sensations des deux yeux. L'année psycholog. 1903, p. 41. Zitiert nach [150]).

148) v. Brücke und Brückner, Zur Frage der Unterscheidbarkeit rechts- u. linksäugiger Gesichtseindrücke. Pflügers Arch. Bd. 90, S. 290, 1902.

149) Dieselben. Über ein scheinbares Organgefühl des Auges. Ebenda, Bd. 91, S. 360, 1902.

150) Dieselben. Nochmals zur Frage der Unterscheidbarkeit rechts- und linksäugiger Eindrücke. Ebenda, Bd. 107, S. 263, 1905.

151) M. v. Fleischl, Physiologisch-optische Notizen. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. Bd. 83, Abt. 3, S. 201, 1881.

152) C. Gaudenzi, Di un doppio perimetro aploscopico etc. Annali di Ottalm. Bd. 28, 1899.

153a) H. Heine, Die Unterscheidbarkeit rechtsäugiger und linksäugiger Wahrnehmungen etc. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1901, S. 615.

153b) Ders. Zur Frage der Unterscheidbarkeit rechts- u. linksäugiger Gesichtseindrücke. Pflügers Arch. Bd. 101, S. 67, 1904.

154) F. B. Hofmann, Die neueren Untersuchungen über das Sehen der Schielenden. Ergebn. d. Physiol. Bd. I, Abt. 2, S. 801, 1902.

155) L. Mandelstamm, Beitrag zur Lehre von der Lage korrespondierender Netzhautpunkte. , Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 18, Abt. 2, S. 133, 1872.

156) W. Schlodtmann, Studien über anomale Sehrichtungsgemeinschaft bei Schielenden. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 51, S. 256, 1901.

157) H. Schöler, Zur Identitätsfrage. Ebenda Bd. 19, Abt. 1, S. 1, 1873.

158) W. Schön, Zur Lehre vom binokularen indirekten Sehen. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 22, Abt. 4, S. 31, 1876.

159) Ders. Zur Lehre vom binokularen Sehen. Ebenda Bd. 24, Abt. 1, S. 27 und Abt. 4, S. 47, 1878.

160) A. Tschermak, Über anomale Sehrichtungsgemeinschaft. Ebenda, Bd. 47, S. 508, 1899.

161) Ders. Autoreferat über die vorige Abhandlung. Zentralbl. f. prakt. Augenheilk. 1899, S. 214.

162) Ders. Über einige neuere Methoden zur Untersuchung des Sehens Schielender. Ebenda, 1902, S. 322 und 357.

VI. Lokalisation nach der Tiefe.

163) Anathon Aal, Über den Maßstab beim Tiefensehen in Doppelbildern. Z. f. Psychol. Bd. 49, I, S. 108 u. 161, 1908.

164) L. E. W. van Albada, Der Einfluß der Akkommodation auf die Wahrnehmung von Tiefenunterschieden. Graefes Arch. f. Ophthalm. Bd. 54, S. 430, 1902.

165) I. C. d'Almeida, Nouvel appareil stéréoscopique. Compt. rend. Bd. 47, S. 61, 1858.

166) M. Arrer, Über die Bedeutung der Konvergenz- und Akkommodationsbewegungen für die Tiefenwahrnehmung. Wundts Philosoph. Studien Bd. 13, S. 116, 1896.

167) I. W. Baird, The influence of accommodation and convergence upon the perception of depht. Amer. Journ. Psychol, Bd. 14, S. 150, 1903.

168) O. Becker u. A. Rollett, Beiträge zur Lehre vom Sehen der dritten Dimension. Wiener Sitzgsber. Bd. 43, 2. Abt., S. 667, 1861.

169) F. Best, Über Projektion stereoskopischer Photographien etc, Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1903, I, S. 449.

170) C. du Bois Reymond, Über Brückes Theorie des Körperlichsehens. Z. f. Psychol. Bd. 2. S. 427, 1891.

171) B. Bourdon, L'acuité stéréoscopique. Rev. philos. Bd. 49, S. 74. 1900. Zit. nach Z. f. Psychol. Bd. 25, S. 256.

172) D. Brewster, Description of several new and simple stereoscopes etc. Transact. Roy. Scott. Soc. Arts, 1849. Philos. Magaz. 1852, (4) Bd. 3, S. 16. Übersetzt von M. v. Rohr (234, S. 38).

173a) L. Burmester, Theorie der geometrisch-optischen Gestalttäuschungen. 1. Mitt. Z. f. Psychol. Bd. 41, I, S. 321, 1906.

173b) Ders. Dass. 2. Mitt. Ebenda Bd. 50, I, S. 219, 1908.

174) H. Carr u. I. B. Allen, A study of certain relations of accommodation and convergence to the judgment of the third dimension. Psychol. Review, Bd. 13, S. 258, 1906.

175) S. Czapski, Das stereoskopische Mikroskop nach Greenough. Z. f. wiss. Mikroskopie Bd. 14, S. 289, 1897.

176) F. C. Donders, Die Projektion der Gesichtserscheinungen nach den Richtungslinien. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 17, Abt. 2, S. 1, 1871.

177) L. Drüner, Über Mikrostereoskopie und eine neue vergrößernde Stereoskopkamera. Z. f. wiss. Mikroskopie Bd. 17, S. 281, 1900.

178) Einthoven, Stereoskopie durch Farbendifferenz. Ebenda Bd. 31, Abt. 3, S. 211, 1885.

179) Ders. On the production of shadow and perspective effects by difference of colour. Brain, 1893, Bd. 16, S. 191. Zit. nach Z. f. Psychol., Bd. 7, S. 413.

180) Elschnig, Zur Kenntnis der binokularen Tiefenwahrnehmung. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 52, S. 294, 1901.

181) Ders. Weiterer Beitrag zur Kenntnis der binokularen Tiefenwahrnehmung. Ebenda Bd. 54, S. 411, 1902.

182) I. R. Ewald und O. Gross, Über Stereoskopie und Pseudoskopie. Pflügers Arch. Bd. 115, S. 514, 1906.

183) S. Exner, Perspektivische Täuschungen an farbigen Bildern etc. Physiol. Zentralbl. Bd. 19, S. 843, 1906.

184) P. Grützner, Einige Versuche über stereoskopisches Sehen. Pflügers Arch. Bd. 90, S. 525, 1902.

185) Th. Guilloz, Sur la stéréoscopie obtenue par les visions consécutives d'images monoculaires. C. rend. Soc. Biol. 1904, I, S. 1053.

186) G. Hauck, Die subjektive Perspektive und die horizontalen Kurvaturen des dorischen Stils. Stuttgart, Wittwer. 1879.

187) L. Heine, Über „Orthoskopie" etc. Graefes Arch. f. Ophthalm. Bd. 51, S. 563, 1900.

188) Ders. Sehschärfe und Tiefenwahrnehmung. Ebenda S. 146, 1900.

189) Ders. Über Orthostereoskopie. Ebenda, Bd. 53, S. 306, 1901.

190) Ders. Über die Bedeutung der Längenwerte für das körperliche Sehen. Bericht 31. Vers. d. Ophthalm. Ges. zu Heidelberg, 1904, S. 179.

191) Ders. Über die richtige Plastik in Stereophotogrammen. Z. f. wiss. Photogr. Bd. 2, S. 65 und 108, 1904.

192) Ders. Zur Frage der binokularen Tiefenwahrnehmung auf Grund von Doppelbildern. Pflügers Arch. Bd. 104, S. 316, 1904.

193) Ders. Über Wahrnehmung und Vorstellung von Entfernungsunterschieden. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 61, S. 484, 1905.

194) Ders. Über Körperlichsehen im Spiegelstereoskop und im Doppelveranten. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1905, I, S. 40.

195) E. Hering, Die Gesetze der binokularen Tiefenwahrnehmung. Du Bois' Archiv 1865, S. 152.

196) Ders. Über die Herstellung stereoskopischer Wandbilder mittels Projektionsapparats. Pflügers Arch. Bd. 87, S. 229, 1901.

197) F. Hillebrand, Die Stabilität der Raumwerte auf der Netzhaut. Z. f. Psychol. Bd. 5, S. 1, 1893.

198) Ders. Das Verhältnis von Akkommodation und Konvergenz zur Tiefenlokalisation. Ebenda, Bd. 7, S. 97, 1893.

199) Ders. In Sachen der optischen Tiefenlokalisation. Ebenda Bd. 15, S. 70, 1897.

200) Ders. Theorie der scheinbaren Größe bei binokularem Sehen. Denkschr. d. Wiener Akad. Math.-naturw. Kl. Bd. 72, S. 255, 1902.

201) W. Holtz, Über den unmittelbaren Größeneindruck in seiner Beziehung zur Entfernung und z. Kontrast. Göttinger Nachrichten, 1893, S. 159.

202) I. Hoppe, Beitrag zur Erklärung des Erhaben- und Vertieftsehens. Pflügers Arch. Bd. 40, S. 523, 1887.

203) I. Isakowitz, Messende Versuche über Mikropie durch Konkavgläser etc. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 66, S. 477, 1907.

204) E. Issel, Messende Versuche über binokulare Entfernungswahrnehmung. Inaug.-Dissertation Freiburg i. B. 1907.

205) G. Jaeger, Das Strobostereoskop. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. Abt. 2a, Bd. 112, S. 985, 1903.

206) J. Jastrow, The pseudoscope and some of its recent improvements. Psychol. Rev. Bd. 7 S. 47, 1900.

207) E. Jensen, Stereoskopische Farbenerscheinung. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1906, I, S. 582.

208) R. H. Kahn, Über Tapetenbilder. Engelmanns Arch. 1907, S. 56.

209) A. Kirschmann, Zum Problem der Grundlagen der Tiefenwahrnehmung. Wundts psycholog. Studien, Bd. 18, S. 114.

210) W. Koster, Zur Kenntnis der Mikropie und Makropie. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 42, 3. Abt., S. 134, 1896. Nachtrag dazu, Ebenda, Bd. 45, S. 90, 1898.

211) R. Kothe, Tiefenvorstellungen und Tiefenwahrnehmungen u. ihre Beziehung zur stereoskopischen Photographie. Z. f. wiss. Photogr. Bd. 1, S. 268 u. 305, 1903.

212) Ders. Über Längsdisparationen u. über die Überplastizität naher Gegenstände. Arch. f. Augenheilk. Bd. 49, S. 338, 1904.

213) E. F. Krusius, Zur Analyse und Messung der Fusionsbreite. Arch. f. Augenheilk. Bd. 61, S. 204, 1908.

214) Ders. Über zweiäugig und einäugig erzeugte Tiefeneindrücke. Ebenda Bd. 62, S. 340, 1909.

215) Ch. Ladd-Franklin, A method for the experimental determination of the horopter. Amer. Journ. of Psychol. Bd. 1, S. 99, 1888.

216) J. Loeb, Über optische Inversion ebener Linienzeichnungen bei einäugiger Betrachtung. Pflügers Arch. Bd. 40, S. 274, 1887.

217) E. Mach, Über die physiologische Wirkung räumlich verteilter Lichtreize. Wiener Sitzgsber. Bd. 54, Abt. 2, S. 393, 1866.

218) Götz Martius, Über die scheinbare Größe der Gegenstände u. ihre Beziehungen zur Größe der Netzhautbilder. Wundts philosoph. Studien, Bd. 5, S. 601. 1889.

219a) S. G. van der Meulen, Stereoskopie bei unvollkommenem Sehvermögen. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 19, Abt. 1, S. 101, 1873.

219b) Ders. und van Dooremaal, Stereoskopisches Sehen ohne korrespondierende Halbbilder. Ebenda, S. 137.

220) H. Meyer, Über einige Täuschungen in der Entfernung u. Größe der Gesichtsobjekte. Arch. f. physiol. Heilk. Bd. 1, S. 316, 1842.

221) E. Moussard, Appareil d'optique au moyen duquel on voit en relief et dans leur sens normal, les objets moulé ou gravés en creux. Cpt. rend. d'Acad. Bd. 124, S. 182, 1897.

222) R. Müller, Über Raumwahrnehmung beim monokularen indirekten Sehen. Wundts philos. Studien Bd. 14, S. 402, 1898.

223) I. I. Oppel, Notiz über ein Anaglyptoskop (Vorrichtg., vertiefte Formen erhaben zu sehen) Jahresber. d. physik. Vereins Frankfurt a. Main, 1854/55, S. 55.

224) G. Pfalz, Ein verbesserter Stereoskoptometer zur Prüfung des Tiefensehätzungsvermögens. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1907, II, S. 85.

225) R. A. Pfeiffer, Über Tiefenlokalisation von Doppelbildern. Wundts psycholog. Studien, Bd. II, S. 129, 1906.

226) L. Pigeon, Sur un stéréoscope dièdre à grand champ, à miroir bisseeteur. Compt. rend. Bd. 141, S. 247, 1905.

227) Pulfrich, Über eine Prüfungstafel für stereoskopisches Sehen. Z. f. Instrumentenkunde, Bd. 21, S. 249, 1901.

228) A. v. Reuss, Über eine optische Täuschung. Z. f. Psychol. Bd. 42, I, S. 101, 1907.

229) M. v. Rohr, Das Sehen. Winkelmanns Handb. d. Physik. 2. Aufl. Bd. 6, S. 270, 1904.

230) Ders. Die Theorie des Doppelveranten etc. Z. f. wiss. Photog. Bd. 2, S. 336, 1904.

231) Ders. Die beim beidäugigen Sehen durch optische Instrumente möglichen Formen der Raumanschauung. Sitzgsber. Münchner Akad. Math.-physik. Kl. Bd. 36, S. 487, 1906.

232) Ders. Über Einrichtungen zur subjektiven Demonstration der verschiedenen Fälle der durch das beidäugige Sehen vermittelten Raumanschauung. Z. f. Psychol. Bd. 41, II, S. 408, 1907.

233) Ders. Die binokularen Instrumente. Nach Quellen bearbeitet. Berlin. Springer 1907.

234) Ders. Abhandlungen zur Geschichte des Stereoskops von Wheatstone, Brewster, usf. Ostwalds Klassiker etc. No. 168. Leipzig, Engelmann. 1908.

235) M. v. Rohr, Zur Dioptrik des Auges. Ergebn. d. Physiol. Bd. 8, S. 541, 1909.

236) A. Rollett, Physiologische Versuche über Binokularsehen, angestellt mit Hilfe planparalleler Glasplatten. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. Bd. 42, S. 488, 1860.

237) W. Rollmann, Zwei neue stereoskopische Methoden. Poggendorffs Annalen, Bd. 90, S. 186, 1853.

238) M. Sachs, Zur Erklärung der Mikropie etc. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 44, S. 87, 1897.

239) Ders. Weitere Bemerkungen zur Mikropiefrage. Ebenda, Bd. 46, S. 621, 1898.

240) A. Schapringer, Zur Theorie der „flatternden Herzen". Z. f. Psychol. Bd. 5, S. 385, 1893.

241) O. Schwarz, Zur akkommodativen Mikropie. Kl. Monatsbl. f. Augenheilk. Bd. 45, S. 42, 1907.

242) W. I. Sinsteden, Über ein pseudoskopisches Bewegungsphänomen. Poggendorffs Annalen, Bd. 111, S. 336, 1860.

242a) F. Stolze, Die Stereoskopie und das Stereoskop in Theorie und Praxis. Enzykl. d. Photogr. Heft 10. Halle, W. Knapp. 2. Aufl. 1908.

243) G. M. Stratton, A mirror pseudoscope and the limit of visible depth. Psychol. Rev. Bd. 5, S. 632, 1898.

244) M. Straub, Über monokulares körperliches Sehen nebst Beschreibung eines als monokulares Stereoskop benutzten Stroboskops. Z. f. Psychol. Bd. 36, S. 431, 1904.

245) A. Tschermak, Beitrag zur Lehre vom Längshoropter etc. Pflügers Arch. Bd. 81, S. 328, 1900.

246) Ders. und P. Hocfer, Über binokulare Tiefenwahrnehmung auf Grund von Doppelbildern. Ebenda, Bd. 98, S. 299, 1903.

247) A. Vicholkowska, Illusions of reversible perspective. Psychol. Rev. Bd. 13, S. 276, 1906.

248) A. W. Volkmann, Das Tachistoskop etc. Sitzgsber. sächs. Gesellsch. d. Wiss. 1859, S. 90.

249) I. E. W. Wallin, Optical illusions of reversible perspective: a volume of historical and experimental researches. Princeton 1905. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 43, I. S. 303.

250a) M. Weinhold, Über das Sehen mit längsdisparaten Netzhautmeridianen. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 54, S. 201, 1902.

250b) Ders. Über Entfernungsvorstellungen bei binokularer Verschmelzung von Halbbildern. Ebenda. Bd. 59, S. 459, 1904.

251) Ch. Wheatstone, Contributions to the theory of vision. Part I. Philos. Transact. 1838, p. 371. Deutsche Übersetzg. in Poggendorffs Annalen, Ergänz.-Bd. 1, S. 1, 1842, und bei M. v. Rohr (No. 234).

252) Ders. Dass. Part II. Philos. Transact. 1852, S. 1. Übersetzt bei M. v. Rohr (234, S. 58).

253) Wood, A new form of pseudoscope. Science, N. S. vol. 10, S. 648, 1899. Zitiert nach Jastrow [206]).

254) W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. 4. Über das Sehen mit zwei Augen. Z. f. rationelle Medizin 3. Reihe, 12. Bd. S. 145, 1861.

255) Ders. Zur Theorie der räumlichen Gesichtswahrnehmungen. Philosoph. Studien. Bd. 14, S. 1, 1898.

VII. Sehen von Bewegungen.

256a) H. Aubert, Die Bewegungsempfindung. Pflügers Arch. Bd. 39, S. 347, 1886.

256b) Dass. 2. Mitt. Nebst Nachtrag. Ebenda, Bd. 40, S. 459, 1887.

257a) A. Basler, Über das Sehen von Bewegungen. 1. Mitt. Ebenda. Bd. 115, S. 582, 1906.

257b) Dass. 2. Mitt. Ebenda, Bd. 124, S. 313, 1908.

258) A. Borschke u. L. Hescheles, Über Bewegungsnachbilder. Z. f. Psychol. Bd. 27, S. 388, 1902.

259) R. Cords u. E. v. Brücke, Über die Geschwindigkeit des Bewegungsnachbildes. Pflügers Arch. Bd. 119, S. 54, 1907.

260) F. B. Dresslar, A new and simple method for comparing the perception of rate of movement in the direct and indirect field of vision. Amer. Journ. of Psychol. Bd. 6, S. 312, 1894.

261) V. Dvorák, Versuche über Nachbilder von Reizveränderungen. Wiener Sitzgsber. Bd. 61, 2. Abt. S. 257, 1870.

262) Th. W. Engelmann, Über Scheinbewegung in Nachbildern. Jenaische Z. f. Medizin. u. Naturwiss. Bd. 3, S. 443, 1867. Zitiert nach Szily[280]).

263) S. Exner, Über das Sehen von Bewegungen u. die Theorie des zusammengesetzten Auges. Wiener Sitzgsber. Bd. 72, Abt. 3, S. 156, 1875.

264) Ders. Ein Versuch über die Netzhautperipherie als Organ z. Wahrnehmung von Bewegungen. Pflügers Arch. Bd. 38, S. 217, 1886.

265) Ders. Einige Beobachtungen über Bewegungsnachbilder. Physiolog. Zentralbl. Bd. 1, S. 135, 1887.

266) Ders. Über autokinetische Empfindungen. Z. f. Psychol. Bd. 12, S. 313, 1896.

267) Ders. Notiz über die Nachbilder vorgetäuschter Bewegungen. Ebenda, Bd. 21, S. 388, 1899.

268) M. v. Fleischl, Physiologisch-optische Notizen. Wiener Sitzgsber. Bd. 86, Abt. 3, S. 17, 1882.

269) H. Gertz, Untersuchungen über Zöllners anorthoskopische Täuschung. Skandinav. Arch. f. Physiol. Bd. 10, S. 53, 1894.

270) I. Hoppe, Studien zur Klärung gewisser Scheinbewegungen. Z. f. Psychol. Bd. 7, S. 29, 1894.

271a) T. Kinoshita, Zur Kenntnis der negativen Bewegungsnachbilder. Z. f. Psychol. Bd. 43, II, S. 420, 1909.

271b) Ders. Über die Dauer des negativen Bewegungsnachbildes. Ebenda, S. 434.

272) E. Mach, Die Analyse der Empfindungen etc. Fischer, Jena. Zitiert nach der 2. Aufl. 1900.

273) I. I. Oppel, Neue Beobachtungen u. Versuche über eine eigentümliche, noch wenig bekannte Reaktionstätigkeit des menschlichen Auges. Poggendorffs Annal. Bd. 99, S. 540, 1856.

274) Plateau, Notiz über ein Anorthoskop. Ebenda, Bd. 37, S. 464, 1836.

275) Ders. Vierte Notiz über eine neue, sonderbare Anwendung des Verweilens der Eindrücke auf der Netzhaut. Ebenda, Bd. 80, S. 289, 1850.

276) L. Ruppert, Ein Vergleich zwischen dem Distinktionsvermögen und der Bewegungsempfindlichkeit der Netzhautperipherie. Z. f. Psychol. Bd. 42, II, S. 409, 1908.

277) L. W. Stern, Die Wahrnehmung von Bewegungen mittels des Auges. Z. f. Psychol. Bd. 7, S. 321, 1894.

278) C. C. Stewart, Zöllners anorthoscopic illusion. Amer. Journ. Psychol. Bd. 11, S. 340, 1900.

279) G. M. Stratton, Visible motion and the space threshold. Psychol. Rev. Bd. 9, S. 433, 1902.

280) A. v. Szily, Bewegungsnachbild und Bewegungskontrast. Z. f. Psychol Bd. 38, S. 81, 1905.

281) Ders. Zum Studium des Bewegungsnachbildes. Ebenda, Bd. 42, II, S. 109, 1908.

282) F. Zöllner, Über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. Poggendorffs Annalen, Bd. 117, S. 477, 1862.

VIII. Augenbewegungen.

283) G. Ahlström, Über die Bewegungsbahnen des Auges. X. Congrès d'Ophthalm. 1904, B, S. 253.

284) A. Ahrens, Untersuchungen über die Bewegung des Auges beim Schreiben. Inaug.-Dissert. Rostock, 1891. Zitiert nach Z. f. Psychol. Bd. 5, S. 408.

285) R. P. Angier, Vergleichende Messung der kompensatorischen Rollungen beider Augen. Z. f. Psychol. Bd. 37, S. 235, 1904.

286) W. Asher, Monokulares und binokulares Blickfeld eines Myopischen. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 47, S. 318, 1898.

287) B. Barnes, Eye-movements. Amer. Journ. Psychol. Bd. 16, S. 199, 1905.

288) A. Basler, Ein Modell, welches die bei bestimmten Stellungen des Auges auftretende scheinbare Verzerrung eines Nachbildes anschaulich macht. Pflügers Arch. Bd. 126, S. 323, 1909.

289) E. Berlin, Beitrag zur Mechanik der Augenbewegungen. Graefes Arch. Bd. 17, Abt. 2, S. 154, 1871.

290) A. Bielschowsky, Über Lähmungen des m. obliquus inferior. Ebenda, Bd. 58, S. 368, 1904.

291) Ders. und A. Ludwig, Das Wesen und die Bedeutung latenter Gleichgewichtsstörungen der Augen etc. Ebenda, Bd. 62, S. 400, 1906.

292) Browning, Binokulares Ophthalmotrop. Arch. f. Augenheilk. Bd. 11, S. 69, 1881.

293) A. Brückner, Über die Anfangsgeschwindigkeit der Augenbewegungen. Pflügers Arch. Bd. 90, S. 73, 1902.

294) Ch. Contejean und A. Delmas, Sur le „mouvement de roue" du globe oculaire etc. Arch. de physiol. 5. sér. Bd. 6, S. 687, 1894.

295) Delabarre, A method of recording eye movements. Amer. Journ. Psychol. Bd. 9, S. 572, 1898.

296) Y. Delage, Sur les mouvements de torsion de l'œil pendant la rotation de la tête. Compt. rend. de l'Acad. Bd. 137, S. 107, 1903 und Arch. de Zool. expér. 1903, S. 261.

297) R. Dodge, Visual perception during eye movements. Psychol. Review, Bd. 7, S. 454, 1900.

298) Ders. und Th. S. Cline, The angle velocity of eye movements. Ebenda, Bd. 8, S. 145, 1901. Vergl. auch Amer. Journ. of Physiol. Bd. 8, S. 307, 1903.

299) Ders. An experimental study of visual fixation. Psychol. Review. Monogr. Supplem. vol. VIII, No. 4. 1907.

300) Ders. und A. G. Diefendorf, An experimental study of the ocular reactions of the insane etc. Brain, Bd. 31, S. 451, 1908.

301) F. C. Donders, Die Anomalien der Refraktion und Akkommodation des Auges. Wien. 1866.

302) Ders. Die Bewegungen des Auges veranschaulicht durch das Phänophthalmotrop. Graefes Arch. Bd. 16, Abt. 1, S. 154, 1870.

303) Ders. Die korrespondierenden Netzhautmeridiane und die symmetrischen Rollbewegungen. Ebenda Bd. 21, Abt. 3, S. 100, 1875.

304) Ders. Versuch einer genetischen Erklärung der Augenbewegungen. Pflügers Arch. Bd. 13, S. 373, 1876.

305) A. Duane, Die Verschiebungsprobe (parallax test) zum Nachweis der Heterophorie. Arch. of Ophth. Bd. 24, Deutsche Übersetz. in Arch. f. Augenheilk. Bd. 31, S. 300, 1895.

306) A. Fick, Neue Versuche über die Augenstellungen. Moleschotts Unters. Bd. 5, S. 193, 1858. Ges. Schriften, Bd. 3, S. 370.

307) C. Gaudenzi, Di un apparecchio per l'esame del'equilibrio muscolare degli occhi. Annali di Ottalm. Bd. 25, 1895.

308) A. Graefe, Artikel „Motilitätsstörungen" in Graefe-Saemischs Handb. d. Augenheilk. 1. Aufl. Bd. 6, T. 4, 1880.

309) Guillery, Über intermittierende Netzhautreizung bei bewegtem Auge. Pflügers Arch. Bd. 71, S. 607, 1898.

310) Ders. Über die Schnelligkeit der Augenbewegungen. Ebenda Bd. 73, S. 87, 1898.

311) H. Helmholtz, Über die normalen Bewegungen des menschlichen Auges. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 9, Abt. 2, S. 153, 1863.

312) E. Hering, Die Lehre vom binokularen Sehen. Leipzig. Engelmann. 1868.

313) Ders. Über Muskelgeräusche des Auges. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. Bd. 79, Abt. 3, S. 137, 1879.

314) Ders. Über anomale Lokalisation der Netzhautbilder bei strabismus alternans. Deutsch. Arch. f. klin. Med. Bd. 64, p. 15, 1899.

315) L. Hermann, Ein Apparat zur Demonstration der aus dem Listingschen Gesetze folgenden scheinbaren Raddrehungen. Pflügers Arch. Bd. 8, S. 305. 1874.

316) Ders. Kleine physiolog. Bemerkungen und Anregungen. Ebenda, Bd. 65, S. 599, 1906.

317) M. Herz, Die Bulbuswege und die Augenmuskeln. Ebenda, Bd. 48, S. 385, 1891.

318) C. Hess, Die relative Akkommodation. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 52, S. 143, 1901.

319) Ders. und F. Neumann, Messende Versuche zur Frage nach dem Vorkommen ungleicher Akkommodation beim Gesunden. Ebenda, Bd. 38, Abt. 3, S. 385, 1892.

320a) F. B. Hofmann, Einige Fragen der Augenmuskelinnervation. I. Teil. Ergebn. d. Physiol. Bd. 2, Abt. 2, S. 799, 1903.

320b) Ders., Dass. 2. Teil. Ebenda, Bd. 5, S. 599, 1906.

321) Ders. und A. Bielschowsky, Über die der Willkür entzogenen Fusionsbewegungen der Augen. Pflügers Arch. Bd. 80, S. 1, 1900.

322) E. B. Holt, Eye-movement and central anaesthesia. Psychol. Rev. Monogr. Suppl. 4. (Nach Z. f. Psychol. Bd. 35, S. 69).

323) Hornemann, Zur Kenntnis der Blickfeldbestimmung. Inaug.-Diss. Halle a. S. 1891. Zitiert nach W. Asher[286]).

324a) E. B. Huey, Preliminary experiments in the physiology and psychology of reading. Amer. Journ. Psychol. Bd. 9. S. 575, 1898.

324b) Ders. On the psychology and physiology of reading. Ebenda, Bd. 11, S. 283, 1900.

325) C. H. Judd, Mc. Allister and W. M. Steele, Introduction to a series of studies of eye movements by means of kinetoscopic photographs. Yale Psychol. Studies Bd. 1, S. 1. (Monogr. Suppl. of Psychol. Review vol. 7). 1905.

326) E. Koch, Über die Geschwindigkeit der Augenbewegungen. Arch. f. d. ges. Psychol. Bd. 13, S. 196, 1908.

327) W. Koster, Une méthode de détermination du point de rotation de l'œil. Arch. néerland. des scienc. exact. et natur. Bd. 30, S. 370, 1896.

328) Ders. Die Akkommodation und die Konvergenz bei seitlicher Blickrichtung. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 42, Abt. 1, S. 140, 1896.

329) S. Lamansky, Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit der Blickbewegung etc. Pflügers Arch. Bd. 2, S. 418, 1869.

330) Ludwig, Zur Demonstration des Hervortretens des Bulbus bei willkürlicher Erweiterung der Lidspalte. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1903, Beilageheft, S. 389.

331a) Maddox, A new test for heterophoria. Ophth. Review, Bd. 9, 1890, p. 129.

331b) Ders. The rod test in ocular pareses and paralyses. Ebenda, p. 287.

332) M. E. Mulder, Über parallele Rollbewegung der Augen. Graefes Arch. Bd. 21, Abt. 1, S. 68, 1875.

333) Ders. De la rotation compensatrice de l'œil en cas d'inclinaison à droite ou à gauche de la tête. Arch. d'Ophth. Bd. 17, S. 465, 1897.

334) I. I. Müller, Untersuchungen über den Drehpunkt des menschlichen Auges. Graefes Arch. f. Ophth. Bd. 14, Abt. 3, S. 183, 1869.

335) A. Nagel, Das Sehen mit zwei Augen. Leipzig u. Heidelberg, 1861.

336a) Ders. Über das Vorkommen von wahren Rollungen um die Gesichtslinie. Graefes Arch. Bd. 14, Abt. 2, S. 228, 1868.

336b) Ders. Dasselbe. Ebenda, Bd. 17, Abt. 1. S. 237, 1871.

337) W. Nagel, Über kompensatorische Raddrehungen der Augen. Z. f. Psychol. Bd. 12, S. 331, 1896.

338) I. Orschansky, Eine Methode, die Augenbewegungen direkt zu untersuchen etc. Zentralbl. f. Physiol. Bd. 12, S. 785, 1899.

339) H. Pereles und F. Halsch, Über die relative Akkommodationsbreite. Graefes Arch. Bd. 35. Abt. 4, S. 84, 1889.

340) Schneller, Studien über das Blickfeld. Ebenda, Bd. 21. Abt. 3, S. 133, 1875.

341) A. Skrebitzky, Ein Beitrag zur Lehre von den Augenbewegungen. Ebenda, Bd. 17, Abt. 1, S. 107, 1871.

342) G. T. Stevens, Die Anomalien der Augenmuskeln. 1. Teil. Arch. f. Augenheilk. Bd. 18, S. 445; 2. Teil, Ebenda Bd. 21, S. 325. Übersetzt aus Arch. of Ophth. Bd. 16 und 17, 1888.

343) G. M. Stratton, Eye-movement and the aestheties of visual form. Wundts Philos. Studien, Bd. 20, S. 336, 1902.

344) Ders. Symmetry, linear illusions and the movements of the eye. Psychol. Review, Bd. 13, S. 81, 1906.

345) A. Tuyl, Über das graphische Registrieren der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Augen. Graefes Arch. Bd. 52, S. 233, 1901.

346) A. W. Volkmann, Zur Mechanik der Augenmuskeln. Ber. sächs. Ges. Wiss. Math.-naturw. Kl. Bd. 21, S. 28, 1869.

347) Weiss, Zur Bestimmung des Drehpunktes im Auge. Graefes Arch. Bd. 21, Abt. 2, S. 132, 1875.

348) Williams, New instrument for testing the position of the axes of the eyes. Transact. Amer. Ophth. Soc. 37th annual meet. p. 383. Zitiert nach Nagels Jahresber. f. Ophth. 1901.

349) M. Woinow, Über den Drehpunkt des Auges. Graefes Arch. Bd. 16, Abt. 1, S. 243, 1870.

350) W. Wundt, Beiträge zur Theorie der Sinneswahrnehmung. 3. Abh. Z. f. ration. Mediz. 3. Serie Bd. 7, S. 321, 1859.

3. Abteilung:

Sinnesphysiologie III

I.

Einführung in die Methoden der Dioptrik des Auges des Menschen[1])

von

A Gullstrand in Upsala.

(Mit 20 Figuren.)

I. Allgemeine Dioptrik.

1. Das Wesen der optischen Abbildung.

Im Gebiete der Dioptrik bewegt sich die physiologische Methodik mehr als in irgend einem anderen auf festem physikalischem Boden, aber gerade in diesem Gebiete stellte auch die Physiologie höhere Anforderungen an die Physik, als diese Wissenschaft erfüllen konnte, weshalb auch im Dienste der medizinischen Wissenschaften zuerst die entbehrten physikalischen Gesetze gefunden werden mußten, bevor die physiologisch-optische Methodik das Ziel erreichen konnte, eine eingehende Kenntnis von der Strahlenbrechung im menschlichen Auge zu gewinnen. Da erst durch diese Gesetze der tatsächliche Vorgang bei der optischen Abbildung endlich ausgedehnter Objekte bekannt wurde, und da dieselben noch nicht allgemein bekannt sein dürften, gebe ich den Inhalt derselben, soweit dies für die vorliegende Darstellung erforderlich ist, hier wieder, muß aber für die Beweise auf meine einschlägigen Arbeiten verweisen.

Wo Licht von einem Körper ausgeht, kann man durch die Erfahrung feststellen, daß dasselbe sich in homogenen Medien in geradlinigen Bahnen fortbewegt. Diese Bahnen, Lichtstrahlen, sind also nichts anderes als gerade Linien. Ebenso lehrt die Erfahrung, daß beim Übergang des Lichtes von einem homogenen Medium in ein anderes eine derartige Brechung der Lichtstrahlen in der die beiden Medien trennenden Fläche stattfindet, daß der gebrochene Strahl stets in der Ebene liegt, welche den einfallenden Strahl und die Normale der Trennungsfläche enthält, der Einfalls- oder

[1]) Wegen der Fülle des Materials konnte ich diese Abteilung nur zu einer Einführung in die Methoden der Dioptrik des menschlichen Auges gestalten. Der ursprüngliche Plan, eine ausführliche Literaturübersicht derselben folgen zu lassen, scheiterte leider an Umständen, über die ich nicht Herr war.

Refraktionsebene, sowie daß die Sinus der Winkel, die der Strahl vor und nach der Brechung mit der Normale bildet, des Einfalls- und des Brechungswinkels, bei zwei bestimmten Medien immer in konstantem Verhältnis stehen. Dieses allgemeine Brechungsgesetz wird, auf die Refraktionsebene bezogen, in der Form

$$n \sin i = n' \sin i'$$

geschrieben, wo $i\,i'$ Einfalls- und Brechungswinkel, $n\,n'$ den Brechungsindex des ersten bzw. zweiten Mediums darstellen und das für die beiden Medien charakteristische Sinusverhältnis somit $n' : n$ ist. Die Werte der Brechungsindizes werden dadurch bestimmt, daß der Brechungsindex im Vakuum gleich 1 gesetzt wird. Aus der geradlinigen Fortbewegung des Lichtes und aus dem allgemeinen Brechungsgesetz folgt unmittelbar die Umkehrbarkeit des Strahlenganges in optischen Systemen mit homogenen, von kontinuierlichen Flächen begrenzten Medien.

Diese beiden Erfahrungstatsachen sind zur mathematischen Entwicklung der exakten Gesetze der Dioptrik hinreichend, aber auch notwendig. Auch für optische Systeme, wo heterogene Medien vorkommen, wie dies im Auge mit der Linse der Fall ist, lassen sich die erforderlichen Gesetze aus diesen beiden Tatsachen deduzieren, wofern nur der Brechungsindex kontinuierlich variabel ist, oder keine anderen Diskontinuitäten in der Indexvariation vorhanden sind als solche, die wie Trennungsflächen zwischen verschiedenen Medien mit kontinuierlich variablem Brechungsindex mathematisch behandelt werden können. Sonst ist der Gültigkeitsbereich der Gesetze der Dioptrik in einfach brechenden Medien nur dadurch beschränkt, daß an dem bei der Abbildung wirksamen Teile der Trennungsflächen streifende Inzidenz der Strahlen, sowie Kanten und Spitzen ausgeschlossen sind.

Die geläufige Vorstellung von der optischen Abbildung ist die, daß allgemein bei hinreichend enger Blendenöffnung einem Objektpunkte ein derart entstandener Bildpunkt entspricht, daß die vom ersteren ausgegangenen Strahlen sich im letzteren schneiden, und daß auf diese Weise ein dem Objekt ähnliches Bild entsteht, eine Vorstellung, welche von der Beschaffenheit des optischen Bildes in der nächsten Umgebung des axialen Bildpunktes in einem zentrierten System scheinbar gestützt wird. Die wissenschaftlichen Untersuchungen haben längst dargelegt, daß diese Vorstellung allgemein nicht zutreffend ist. Da aber die exakten Gesetze nicht bekannt waren, blieb vorläufig kein anderer Ausweg offen, als nach der Abbeschen Theorie der kollinearen Abbildung, welche heute noch den Darstellungen der Handbücher zugrunde liegt, ein fiktives System zu schaffen und die tatsächlichen Verhältnisse als Abweichungen von diesem zu charakterisieren. Diese Theorie ist nichts anderes als ein mathematisches Kleid der oben als geläufig bezeichneten Vorstellung und stellt tatsächlich nur ein unrealisierbares Ideal dar. Offenbar würde es auch als solches dienen können, wenn es nur möglich wäre, die Tatsachen als Abweichungen von diesem Ideale konsequent darzustellen. Bei der Brechung unter schiefem Lichteinfalle genügt aber nicht eine einheitliche kollineare Abbildung, sondern man mußte mit zwei verschiedenen rechnen, und dennoch lernte man nur den Abbildungsvorgang kennen, soweit derselbe durch Strahlen bestimmt wird, welche in der Meri-

dianebene verlaufen oder durch eine auf diese senkrecht stehende Linie gegangen sind, Strahlen, welche zusammen einen unendlich kleinen Teil der bei der Abbildung wirksamen Strahlenmenge ausmachen.

Zum Verständnis der reellen optischen Abbildung ist der Begriff der optischen Projektion nötig. Wenn im Raume ein beliebiger Punkt als Projektionszentrum gewählt wird, so sind sämtliche auf einer und derselben, durch diesen Punkt gehenden Linie belegenen Punkte die Projektionen von einander, und wird somit ein Objekt auf eine beliebige Ebene projiziert, wenn Linien vom Projektionszentrum durch die verschiedenen Objektpunkte gezogen und verlängert werden, bis sie die Ebene schneiden. Ganz analog ist die optische Projektion, indem in einem optischen Systeme ein Punkt irgendwo als Projektionszentrum gewählt wird und die durch denselben gehenden Lichtstrahlen beim Gang durch das System die Projektion vermitteln. Gewöhnlich wird als Projektionszentrum das Blendenzentrum gewählt. Die verschiedenen durch dasselbe gehenden Lichtstrahlen werden Hauptstrahlen genannt und entsprechen jeder einem verschiedenen Objektpunkte, so daß die Schnittpunkte der Hauptstrahlen mit einer beliebigen im Wege des Lichtes belegenen Fläche die Projektionen der betreffenden Objektpunkte auf dieselbe darstellen. Sämtliche durch eine Objektlinie gehenden Hauptstrahlen bilden zusammen eine Fläche, Hauptstrahlenfläche. Wird dieselbe irgendwo durch eine andere Fläche geschnitten, so ist die Schnittlinie somit die Projektion der Objektlinie auf diese Fläche. Aber auch ein Objektpunkt kann als Projektionszentrum dienen. Letzteren Vorgang kann man dadurch illustrieren, daß in einem optischen Instrumente eine möglichst punktförmige Lichtquelle angebracht wird und der Schatten eines irgendwo im Wege des Lichtes gehaltenen Drahtes auf eine beliebig belegene Fläche beobachtet wird; ersteren Vorgang illustriert man am einfachsten auf der Mattscheibe eines nicht fokusierten photographischen Apparates mit kleiner Blende. Man erhält auf diese Weise ein optisches Bild das mehr oder weniger verschwommen und allgemein, wenn die Blende nicht einen bestimmten Platz hat, dem Objekte unähnlich ist. Der Mangel an Schärfe in dem bei der optischen Projektion entstandenen Bilde beruht darauf, daß der einem leuchtenden Objektpunkte entsprechende annähernd gleichmäßig helle Lichtkreis auf der Mattscheibe von derselben Größenordnung ist wie die Blende. Während also bei der physikalischen Illustration der optischen Projektion immer einem Objektpunkte von mehreren Punkten der Bildfläche entsprochen wird, so besteht doch eine punktuelle Korrespondenz zwischen Objekt und Bild im mathematischen Begriffe der optischen Projektion, da dieser Begriff sich nur auf das Blendenzentrum, nicht auf eine endlich ausgedehnte Blende bezieht.

Das schärfere Bild, welches durch optische Abbildung erhalten wird, kommt unter Strahlenvereinigung zustande. Hierunter wird aber nicht verstanden, daß von einem Objektpunkte ausgegangene Strahlen, welche durch endlich von einander entfernte Punkte der Blendenöffnung gehen, sich im Bildpunkte schneiden, sondern die Strahlenvereinigung bezieht sich nur auf nächstliegende Strahlen. Wenn in dem von einem Objektpunkte ausgegangenen Strahlenbündel die nach allen Richtungen dem Hauptstrahl nächstliegenden Strahlen denselben in einem Punkte schneiden, so ist dieser

Punkt die optische Abbildung des Objektpunktes. Für die optische Abbildung von Linien ist es aber nicht nötig, daß sämtliche Punkte der Objektlinie in Punkte der Bildlinie abgebildet werden, sondern es genügt, daß sämtliche den Hauptstrahlen nächstliegenden Strahlen die Bildlinie schneiden. Die so zustande kommende optische Abbildung von Punkten bzw. Linien ist in der mathematischen Sprache durch eine vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung charakterisiert.

Es findet nun allgemein in optischen Systemen eine Abbildung von Linien, nicht aber von Punkten statt, indem auf einer beliebigen Objektfläche durch jeden Punkt zwei Linien gehen, welche optisch abgebildet werden. Die abbildbaren Linien der Objektfläche bilden zusammen zwei Liniensysteme, welche sich überall schneiden, während Schnittpunkte von Linien eines und desselben Systems allgemein nicht vorkommen, sondern sogenannte singuläre Punkte darstellen. Jedes System wird auf einer anderen Fläche abgebildet. Auf jeder dieser Bildflächen geht somit durch jeden Punkt eine Bildlinie. Nur in den singulären Punkten, wo die beiden Bildflächen einander berühren, kommen Schnittpunkte von Bildlinien vor. Diese singulären Punkte liegen auf denselben Hauptstrahlen wie die singulären Punkte der abbildbaren Linien. Sowohl die Bildflächen wie die Bildliniensysteme sind der Objektfläche bzw. den Systemen abbildbarer Linien unähnlich, und die Vergrößerung variiert von Punkt zu Punkt. Da die Liniensysteme nicht punktuell abgebildet werden, so kann die Vergrößerung nur durch das Verhältnis des Abstandes zweier Bildlinien zum Abstande der entsprechenden abbildbaren Linien ausgedrückt werden und wird in jedem Punkte der Objektfläche durch zwei den beiden Abbildungen entsprechende Vergrößerungskoeffizienten angegeben, welche die Grenzwerte der Vergrößerung für unendlich nach Null abnehmende Abstände der abbildbaren Linien darstellen, wenn sowohl diese wie die Bildlinien auf eine zum Hauptstrahl senkrechte Ebene projiziert werden.

Dies sind die Grundzüge der allgemeinen optischen Abbildung. Wenn nicht die Diffraktion des Lichtes die optische Abbildung bei unendlich kleiner Blendenöffnung vereitelte, so würde sie bei solcher Blende dadurch charakterisiert sein, daß alle von einer abbildbaren Objektlinie ausgegangenen Lichtstrahlen durch die betreffende Bildlinie gehen. Je kleiner die endlich große Blendenöffnung ist, um so mehr nähert sich der Vorgang bei der physikalischen Abbildung dieser Vorstellung, während bei großer Blende eine nähere Kenntnis der Abbildung nur durch wiederholte Untersuchung derselben gewonnen werden kann, indem verschiedene in der Blendenöffnung belegene Punkte als Blendenzentra gewählt werden.

Die die Abbildung bestimmenden Größen können nur für die nächste Umgebung eines ausgewählten Objektpunktes erhalten werden, so daß allgemein die Untersuchung längs so vielen Hauptstrahlen wiederholt werden muß, wie es die zu erzielende Kenntnis der Abbildung in jedem Falle erforderlich macht. Ein solcher ausgewählter Objektpunkt wird in der Untersuchung der zentrale Objektpunkt, der durch denselben gehende Hauptstrahl der zentrale Strahl oder Leitstrahl genannt, während die dem Leitstrahl nächstliegenden Teile des optischen Systems das betreffende Abbildungssystem ausmachen. Sowohl das optische System als ganzes wie

das einzelne Abbildungssystem wird als achsensymmetrisch, symmetrisch, einfach asymmetrisch oder doppelt asymmetrisch bezeichnet, je nachdem es unendlich viele, zwei, eine oder gar keine Symmetrieebene besitzt, wobei aber betreffs der Abbildungssysteme die Objektfläche dieselben Symmetrieebenen haben muß wie die brechenden Flächen.

Je nachdem die Abbildungsgesetze durch ein- oder mehrmalige Ableitungen aus dem allgemeinen Brechungsgesetz erhalten werden, heißen sie die Gesetze erster, zweiter Ordnung usw. In doppelt asymmetrischen Systemen sind nur die Gesetze erster Ordnung anwendbar, und auch diese werden durch ziemlich komplizierte, mühevolle Rechnungen erfordernde Formeln dargestellt. Die Abbildungen sind nur dann zusammensetzbar, wenn das doppelt asymmetrische Abbildungssystem aus Teilsystemen besteht, welche in bezug auf die Abbildungsgesetze erster Ordnung einfach asymmetrisch oder symmetrisch sind, und wenn stets die Symmetrieebene eines folgenden Teilsystems mit derjenigen des vorhergehenden zusammenfällt oder auf derselben senkrecht steht, wobei längs dem Leitstrahl immer eine der abbildbaren Linien und der Bildlinien in der Refraktionsebene, die andere in der auf derselben senkrecht stehenden, den Leitstrahl enthaltenden Ebene liegt. Sonst sind allgemein die Bildlinien eines vorhergehenden Teilsystems keine abbildbaren Linien im folgenden. Außerdem sind sowohl abbildbare Linien wie Bildlinien allgemein je nach der Objektentfernung verschieden orientiert. Durch die Formeln erhält man die Schnittpunkte der Bildflächen mit dem Leitstrahl, die Orientierung der denselben schneidenden abbildbaren Linien und Bildlinien sowie die beiden Vergrößerungskoeffizienten in den Schnittpunkten, welche sämtliche Größen von der Lage der Blende auf dem Leitstrahl unabhängig sind. Beim Auffangen eines Bildes auf einer Schirmfläche erhält man somit allgemein höchstens eine optische Abbildung eines Liniensystems und hat man für eine beliebige Objektlinie gewöhnlich nur mit der optischen Projektion zu rechnen. Die Formeln ergeben hierbei die Orientierung der Projektion und den linearen Projektionskoeffizienten, worunter der Grenzwert verstanden wird, den das Verhältnis der Länge der Projektion zur Länge der Objektlinie erhält, wenn diese Länge unendlich nach Null abnimmt, und sowohl Objektfläche wie Schirmfläche senkrecht auf dem Leitstrahl stehen. Während hierbei das Blendenzentrum (bzw. ein ausgewählter Blendenpunkt) das Projektionszentrum darstellt, so wird letzteres vom zentralen Objektpunkte repräsentiert, wenn vom anguläreu Projektionskoeffizienten die Rede ist. Die im Objektraum den Leitstrahl enthaltende Ebene, welche senkrecht auf der durch den Leitstrahl und die Tangente einer abbildbaren Linie gelegten Ebene steht, bildet zusammen mit der im Bildraum in bezug auf die entsprechende Bildlinie analog konstruierten Ebene ein konjugiertes Paar von Ebenen fokaler Projektion, welche dadurch charakterisiert sind, daß Linienelemente, welche außerhalb der Objekt- und der entsprechenden Bildfläche in diesen Ebenen gelegen sind, in einander projiziert werden können. Den Grenzwert, den das Verhältnis der Winkel, unter welchen die beiden Linien vom Bildpunkte und vom Objektpunkte aus gesehen werden, bei stetig gegen Null abnehmender Länge derselben annimmt, stellt eben der anguläre Projektionskoeffizient dar. Da es zwei solche Ebenenpaare gibt, so gibt es somit bei jeder opti-

schen Abbildung zwei anguläre Projektionskoeffizienten, und es ist immer das Produkt des Vergrößerungskoeffizienten mit dem betreffenden angulären Projektionskoeffizienten und dem relativen Brechungsindex des Systems (dem Verhältnis des Brechungsindex im Bildraum zu demjenigen im Objektraum) gleich der Einheit.

Da das doppelt asymmetrische System die allgemeine Form darstellt, so hat auch ein in einem solchen gebrochenes Strahlenbündel in der Regel die allgemeine Form. Da nun eine analytische Umformung des Brechungsgesetzes ergibt, daß in einem von einem Objektpunkte ausgegangenen Strahlenbündel überall im System eine Fläche — Wellenfläche genannt — gelegt werden kann, welche sämtliche Strahlen senkrecht schneidet, so fallen die Strahlen in homogenen Medien mit den Normalen dieser Fläche zusammen, während in heterogenen Medien mit kontinuierlich variablem Brechungsindex die gekrümmten Lichtwege — die Trajektorien — von den Normalen der Wellenfläche berührt werden. Man ermittelt somit die allgemeine Konstitution des Strahlenbündels durch eine allgemeine Untersuchung der Flächen. Dies kann aber nur mit differential-geometrischen Mitteln geschehen, wobei die Fläche in der nächsten Umgebung eines ausgewählten Punktes untersucht, das Strahlenbündel somit nur längs einem ausgewählten Strahle bekannt wird. Im allgemeinen wird nun ein Strahl in zwei verschiedenen Punkten von nächstliegenden Strahlen geschnitten. Wenn somit ein Objektstrahlenbündel längs dem Hauptstrahl untersucht wird, so ist es zunächst durch zwei auf demselben belegene Fokalpunkte charakterisiert, wobei es astigmatisch längs diesem Strahle genannt wird. Die Ebene, welche die dem Hauptstrahl nächstliegenden Strahlen enthält, die ihn in einem Fokalpunkt schneiden, ist der gleichnamige Hauptschnitt des Strahlenbündels längs dem Hauptstrahl und beide Hauptschnitte stehen senkrecht auf einander. Die Fokalebenen stehen in den Fokalpunkten senkrecht auf dem Hauptstrahl. Die in den Fokalpunkten senkrecht auf den gleichnamigen Hauptschnitten stehenden Linien sind die gleichnamigen Fokallinien, welche somit Schnittlinien der gleichnamigen Fokalebenen mit den ungleichnamigen Hauptschnitten darstellen. Sowohl die Fokalpunkte wie die Hauptschnitte ändern sich nun allgemein beim Übergang auf andere Strahlen derart, daß sämtliche gleichnamigen Fokalpunkte die gleichnamige kaustische Fläche bilden, welche überall von den ungleichnamigen Hauptschnitten berührt wird. Wenn hierbei auf einem Strahle die beiden Fokalpunkte in einen zusammenfallen, so ist das Strahlenbündel längs diesem Strahle anastigmatisch aber allgemein auch nur längs diesem Strahle. Zieht man auf einer Wellenfläche eine Linie, so bilden die durch diese Linie gehenden Strahlen eine Fläche. Von solchen Strahlenflächen gibt es nun zwei Arten. Im allgemeinen Falle sind sie längs einem gewissen Strahle windschief, wobei die diesen Strahl enthaltende Tangentialebene der Strahlenfläche, wenn man auf demselben von unendlich großem negativen Abstande zum unendlich großen positiven fortschreitet, eine 180^0 betragende Drehung erfährt, und dieser Strahl nirgends von nächstliegenden geschnitten wird. In anderen Fällen wird aber derselbe in einem Punkte von den nächstliegenden Strahlen geschnitten. Es handelt sich dann um eine längs diesem Strahl fokale Strahlenfläche, deren den betreffenden Strahl ent-

haltende Tangentialebene überall unverändert bleibt, im erwähnten Schnittpunkte aber unbestimmt ist, so daß in der mathematischen Sprache hier jede den betreffenden Strahl enthaltende Ebene eine Tangentialebene der Strahlenfläche darstellt. Die Strahlenflächen, welche längs einem Strahle eines Strahlenbündels einen Hauptschnitt berühren, sind fokal, die übrigen windschief. Die allgemeine Konstitution des Strahlenbündels ist dadurch exakt definiert, daß jede, einen beliebigen Strahl enthaltende Strahlenfläche von den beiden, diesem Strahl zugehörigen Fokallinien berührt wird, oder dadurch, daß sämtliche einem beliebigen Strahl nächstliegenden Strahlen durch die beiden, ersterem zugehörigen Fokallinien gehen, wobei man sich aber an den exakten Begriff eines nächstliegenden Strahles erinnern muß. Bei einer fiktiven unendlich kleinen Blende würden zwar sämtliche Strahlen durch die beiden Fokallinien gehen, aber in der Realität kann man sich diesem Bilde des bekannten Sturmschen Konoides nur dann einigermaßen nähern, wenn die Blendenöffnung nicht nur im Verhältnis zu den Fokalabständen, sondern auch im Verhältnis zur Brennstrecke — dem Abstande der Fokalpunkte voneinander — sehr klein ist. Die letztere Bedingung ist es, welche allgemein vergessen wurde, als das Konoid von Sturm zum Modell des allgemeinen Strahlenbündels in Anwendung kam, denn dieselbe ist weder im Auge noch in den gebräuchlichen optischen Instrumenten erfüllt, das Konoid auch nicht anwendbar.

Wesentliche Vereinfachungen erfahren die Abbildungsgesetze erster Ordnung im einfach asymmetrischen und noch mehr im symmetrischen System, für welche ich auch die Gesetze zweiter bzw. dritter Ordnung ermittelt habe. Die Abbildungen sind zusammensetzbar, aber man muß immer noch mit den verschiedenen Abbildungen der beiden Liniensysteme rechnen. Nur in achsensymmetrischen Systemen, für welche die Gesetze dritter Ordnung bei sphärischer Form der Flächen schon längst bekannt waren, ist dies betreffs der Gesetze erster Ordnung scheinbar nicht der Fall. Dies beruht darauf, daß die abbildbaren Linien und Bildlinien Meridianlinien und Parallelkreise auf der Objektfläche und den Bildflächen darstellen, und daß die Gesetze erster Ordnung auf der Achse nur für den Punkt gelten, in welchen die Parallelkreise bei stetig gegen Null abnehmenden Durchmessern übergehen, also nur für das eine System der abbildbaren Linien und Bildlinien.

Die praktische Bedeutung der verschiedenen Abbildungssysteme erhellt aus einem Vergleich der Abbildung mittels einer sphärischen und einer sphärozylindrischen oder bizylindrischen Linse. In letzterer gelten, je nachdem der zentrale Objektpunkt außerhalb der beiden Symmetrieebenen, in einer derselben oder auf der Schnittlinie beider gelegen ist, die Gesetze doppelt asymmetrischer bzw. einfach asymmetrischer und symmetrischer Abbildungssysteme, während in der sphärischen Linse für die Abbildung auf der Achse die Gesetze achsensymmetrischer Systeme und für die Abbildung exzentrisch gelegener Objektteile die Gesetze einfach asymmetrischer Systeme gelten, welche letztere noch einige Vereinfachungen dadurch erfahren, daß das optische System als ganzes achsensymmetrisch ist.

Der gewöhnliche Fall der Abbildung einer ausgedehnten Objektfläche in einem achsensymmetrischen optischen System gestaltet sich folgendermaßen: Wenn die Objektfläche entweder eine achsensenkrechte Ebene oder

eine koaxiale Umdrehungsfläche darstellt, so sind überall im System die Bildflächen mit dem System koaxiale Umdrehungsflächen, und es stellen sowohl abbildbare Linien, wie Bildlinien, Meridiane und Parallelkreise dar. Die beiden Bildflächen, welche einander im Schnittpunkte mit der Achse berühren, haben in diesem eine verschiedene Krümmung und gehen peripheriewärts allgemein (d. h. spezielle Konstruktionstypen ausgenommen) weiter auseinander. Bei ebener Objektfläche und reellem Bilde kehren sie in der Regel die konkave Seite dem Lichte zu, und ist diejenige, auf welcher die Parallelkreise abgebildet werden, schärfer gekrümmt. Wäre die Abbildung mit unendlich kleiner Blende realisierbar, so würde mithin nur der axiale Objektpunkt als Punkt abgebildet werden. In der Realität stellt sich aber die Sache bei endlicher Blendengröße günstiger. Ein von einem endlich nahe der Achse belegenen Objektpunkte ausgegangenes Strahlenbündel ist zwar längs dem Hauptstrahl astigmatisch, kann aber, wenn die Blende nicht zu klein im Verhältnis zum Achsenabstande des Objektpunktes ist, längs einem durch einen anderen Blendenpunkt gehenden Strahle anastigmatisch sein, wobei also ein endliches den Schnittpunkt mit der Achse umgebendes Gebiet der Objektfläche wirklich punktuell abgebildet wird. Außerdem handelt es sich bei der physikalischen Abbildung nie um mathematische Punkte und Linien, weshalb auch bei kleinen Abständen der Fokalpunkte von einander und von der Schirmfläche die optische Projektion eine genügende Schärfe gibt. Hierauf beruht es, daß in der Umgebung des axialen Bildpunktes ein Gebiet vorhanden ist, wo die Abbildung praktisch nicht von einer punktuellen unterschieden werden kann. Durch besondere Konstruktion der Systeme kann dieses Gebiet wie z. B. in den modernen photographischen Objektiven, erheblich vergrößert werden. Daß auch im Gebiete der punktuellen Abbildung die Strahlenvereinigung nur nächstliegende Strahlen betrifft, davon erhält man eine Vorstellung, wenn man das durch eine gewöhnliche bikonvexe Linse mit großer Öffnung auf einem Schirm aufgefangene Bild des glühenden Fadens einer elektrischen Birne beobachtet, indem das Bild nur dann scharf ist, wenn es von einem Schleier überdeckt erscheint. Dieser Schleier rührt von den Lichtstrahlen her, welche an der Abbildung keinen Teil nehmen, sondern Zerstreuungskreise bilden, und der Versuch beweist, daß die Strahlenbündelquerschnitte nicht die denselben zugeschriebene Bedeutung haben, sondern daß die Querschnitte der kaustischen Flächen, auf welchen allein die Strahlenvereinigung vorkommt, für die Abbildung maßgebend sind.

Die allgemein bei der Abbildung auftretenden Farbenerscheinungen beruhen darauf, daß der Brechungsindex von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist, und bedingen chromatische Differenzen der die Abbildung charakterisierenden Größen.

2. Die speziellen Abbildungsgesetze erster Ordnung.

Von den doppelt asymmetrischen Abbildungssystemen abgesehen, lassen sich diese Gesetze, wie ich gezeigt habe, in einfachster, einem jeden zugänglicher Form darstellen. Da ich die Herleitung derselben mit einfachen Mitteln neulich an anderer Stelle durchgeführt habe, wo dieselbe den Lesern

dieses Buches leicht zugänglich ist, kann ich mich hier darauf beschränken, die Formeln selbst und ihre Anwendung zu besprechen.

Im **einfach asymmetrischen Abbildungssystem** wird die Symmetrieebene als Tangentialebene oder auch, wenn das optische System als ganzes ein Umdrehungssystem darstellt, als Meridianebene, die auf derselben in jedem Medium senkrecht stehende, den Leitstrahl enthaltende Ebene als Sagittal- bzw. Äquatorealebene bezeichnet. Von den beiden Abbildungen wird diejenige, für welche die in der Tangentialebene verlaufenden Strahlen maßgebend sind, als die erste bezeichnet. Das erste System von abbildbaren Linien und Bildlinien schneidet somit überall die Tangentialebene unter rechten Winkeln, während eine Linie des zweiten Systems immer in derselben liegt. Die ersten Fokalpunkte eines Objektstrahlenbündels in den verschiedenen Medien sind einander und dem Objektpunkte in bezug auf die erste Abbildung konjugiert usw. Tangential- und Sagittalebene stellen den ersten bzw. zweiten Hauptschnitt der Strahlenbündel dar.

Allgemein mag das System aus brechenden und spiegelnden Flächen in beliebiger Folge bestehen, welche Medien mit konstantem oder kontinuierlich variablem Brechungsindex von einander trennen. Längs dem Leitstrahl wird überall diejenige Richtung als positiv bezeichnet, welche mit der Lichtbewegung im Objektraume gleichsinnig ist, so daß immer nach einer ungeraden Anzahl von Spiegelungen die Lichtbewegung in der negativen, nach einer geraden aber in der positiven Richtung stattfindet. In den Medien, wo die Lichtbewegung in der negativen Richtung stattfindet, hat der Brechungsindex negatives Vorzeichen. Der Abstand eines Punktes von einem anderen ist positiv, wenn man vom letzteren Punkte, der positiven Richtung folgend, zum ersteren gelangt. Ein Krümmungsradius ist der Abstand des Krümmungsmittelpunktes vom Flächenpunkte, die Krümmung einer Fläche somit positiv, wenn die konkave Seite der positiven Richtung zugekehrt ist. Der reduzierte Abstand eines Punktes von einem anderen ist der durch den Brechungsindex dividierte Abstand und somit immer positiv, wenn man, der Richtung der Lichtbewegung folgend, vom letzteren Punkte zum ersteren gelangt. Der reziproke Wert des reduzierten ersten Fokalabstandes in einem Strahlenbündel ist die erste reduzierte Konvergenz desselben im betreffenden Punkte oder die reduzierte Konvergenz in bezug auf die erste Abbildung. Die reduzierte Konvergenz hat demnach überall positives bzw. negatives Vorzeichen, je nachdem die Strahlen in der Richtung der Lichtbewegung konvergieren oder divergieren. Die tangentiale erste oder vordere bzw. zweite oder hintere Brennweite ist der Abstand des betreffenden Hauptbrennpunktes vom Hauptpunkte. Die tangentiale Brechkraft des Systems ist der reziproke Wert der reduzierten zweiten tangentialen Brennweite und ist numerisch, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen gleich dem reziproken Werte der reduzierten ersten Brennweite. Die Brechkraft ist somit immer positiv, wenn das System in bezug auf die betreffende Abbildung sammelnd, negativ, wenn es zerstreuend wirkt. Ist der Meter die Längeneinheit, so stellt die Dioptrie die Einheit der Brechkraft und der reduzierten Konvergenz dar. Wird der Millimeter als Längeneinheit gewählt, so ist somit die Einheit der Brechkraft und der reduzierten Konvergenz das Tausendfache der Dioptrie.

Ein einfach asymmetrisches Abbildungssystem ist bekannt, wenn durch trigonometrische Rechnung der Verlauf des Leitstrahls durch das System ermittelt worden ist, und wenn man in bezug auf jede der beiden Abbildungen einen auf dem Leitstrahl im ersten Medium belegenen und den im letzten Medium demselben konjugierten Punkt, die betreffenden Vergrößerungskoeffizienten $\varkappa$, $\varkappa_{„}$, sowie die tangentiale bzw. sagittale Brechkraft D, $D_{„}$ kennt. Da die beiden Punktpaare willkürlich gewählt werden können, seien sie im folgenden kurz als die Wahlpunkte des Systems in bezug auf die betreffende Abbildung bezeichnet. Die reduzierte Konvergenz A, $A_{„}$ bzw. B, $B_{„}$ des einfallenden und gebrochenen Strahlenbündels wird im betreffenden ersten bzw. zweiten Wahlpunkt gemessen. Letztere Werte, sowie die Vergrößerungskoeffizienten K, $K_{„}$ in den Fokalpunkten des gebrochenen Strahlenbündels ergeben die allgemeinen Abbildungsgleichungen

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D \qquad \varkappa K B = A \tag{1}$$

In dem von einer einzelnen Fläche repräsentierten System seien ii′ Einfalls- und Brechungswinkel, $\varrho, \varrho_{„}$ der tangentiale bzw. sagittale Krümmungshalbmesser, nn′ der Brechungsindex des vorhergehenden bzw. des folgenden Mediums. Läßt man sämtliche Wahlpunkte mit dem Inzidenzpunkt zusammenfallen, so ist

$$\varkappa = \frac{\cos i'}{\cos i} \qquad \varkappa_{„} = 1$$

$$D = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{\varrho \cos i' \cos i} \qquad D_{„} = \frac{n' \cos i' - n \cos i}{\varrho_{„}}, \tag{2}$$

wobei aber zu bemerken ist, daß der angegebene Wert von D, nur dann gültig ist, wenn beide Medien homogen sind, andernfalls aber noch Differentialquotienten der Indizialgleichung erhält. Ebenso ist der Durchgang des Lichtes durch ein heterogenes Medium mit kontinuierlich variablem Brechungsindex dem Durchgang durch ein optisches System gleichwertig. Die zur Kenntnis dieses Systems nötigen Wahlpunkte, Vergrößerungskoeffizienten und Brechkraftwerte sind durch definite Integrale gegeben und lassen sich in der Kristallinse durch Serienentwicklung mit beliebiger Genauigkeit ermitteln.

Die so bekannten Einzelsysteme können in bezug auf jede Abbildung für sich zusammengesetzt werden. Wenn Brechkraft und Vergrößerungskoeffizient in den Wahlpunkten mit D_1 $\varkappa_1$, bzw. D_2 $\varkappa_2$ für das erste bzw. zweite System bezeichnet werden, und δ den reduzierten Abstand des ersten Wahlpunktes des zweiten Systems vom zweiten Wahlpunkt des ersten Systems darstellt, so sind die allgemeinen Formeln für die Zusammensetzung zweier Systeme:

$$D_{12} = \frac{D_1}{\varkappa_2} + \varkappa_1 D_2 - \delta D_1 D_2$$

$$W'_{12} = -\frac{\varkappa_2{}^2 \delta}{1 - \varkappa_2 \delta D_2} \tag{3}$$

$$\varkappa_{12} = \frac{\varkappa_1 \varkappa_2}{1 - \varkappa_2 \delta D_2} \qquad \text{zu (3)}$$

in welchen D_{12} die Brechkraft des Vollsystems ist, $W'_{12}\,\varkappa_{12}$ den reduzierten Abstand des zweiten Wahlpunktes des Vollsystems vom zweiten Wahlpunkte des zweiten Teilsystems und den Vergrößerungskoeffizienten in demselben darstellen, wenn der erste Wahlpunkt des Vollsystems mit dem ersten des ersten Teilsystems zusammenfällt. Durch sukzessive Anwendung dieser Formeln kann man immer ein beliebiges einfach asymmetrisches Abbildungssystem bekannt machen. Da in der physiologischen Optik die Zahl der Teilsysteme wohl immer einzifferig ist, so empfiehlt es sich, als Index eines zusammengesetzten Systems die beiden Indizes des ersten und letzten Teilsystems zu benutzen, so daß z. B. D_{24} die Brechkraft des aus dem zweiten, dritten und vierten Teilsystem zusammengesetzten Systems bedeutet usw.

Die Gleichungen (1) bis (3) gelten allgemein für Brechung und Spiegelung, die Brechkraft mag einen endlichen Wert haben oder gleich Null sein. Ist letzteres der Fall, so heißt das System afokal, und der Vergrößerungskoeffizient ist überall konstant. Ein solches System stellt z. B. eine brechende Fläche dar, wenn der betreffende Krümmungsradius unendlich groß ist, oder aber es entsteht bei der Zusammensetzung von zwei Systemen, wie in einem für unendlichen Abstand und emmetropische Augen eingestellten Fernrohr. Man hat dann nur den betreffenden Brechkraftwert in den Formeln gleich Null zu setzen. Sollten die Formeln (3) unendlich große Werte für W'_{12} und $\varkappa_{12}$ ergeben, so kann man mit Hilfe der Formeln (1) ein beliebiges anderes Paar von Wahlpunkten für das erste Teilsystem aufsuchen, wonach die Formeln (3) angewendet werden können, oder aber man wendet das Gleichungssystem

$$\begin{aligned} D_{12} &= \frac{D_1}{\varkappa_2} + \varkappa_1 D_2 - \delta D_1 D_2 \\ H_{12} &= \frac{1}{\varkappa_1 D_{12}} \left(\delta D_2 + \varkappa_1 - \frac{1}{\varkappa_2}\right) \\ H'_{12} &= -\frac{\varkappa_2}{D_{12}} \left(\delta D_1 + \frac{1}{\varkappa_2} - \varkappa_1\right) \end{aligned} \qquad (3a)$$

an, in welchem $H_{12}\ H'_{12}$ die reduzierten Abstände des ersten bzw. zweiten Hauptpunktes des Vollsystems vom ersten Wahlpunkte des ersten bzw. vom zweiten Wahlpunkte des zweiten Teilsystems darstellen. Dasselbe kann aber anderseits nicht in den Fällen angewendet werden, wo das Vollsystem afokal ist.

Für die sagittale Abbildung fallen die Hauptpunkte der einzelnen brechenden Flächen in den Inzidenzpunkten zusammen. Man kann deshalb hier, und wo sonst die Hauptpunkte der Teilsysteme bekannt sind, das einfachere Gleichungssystem

$$D_{12} = D_1 + D_2 - \delta D_1 D_2 \qquad H_{12} = \frac{\delta D_2}{D_{12}} \qquad H'_{12} = -\frac{\delta D_1}{D_{12}} \qquad (3b)$$

anwenden, welches aber versagt, sobald entweder ein Teilsystem oder das Vollsystem afokal ist, den Fall ausgenommen, wo nur ein Teilsystem afokal ist und den Vergrößerungskoeffizienten eins hat. Es sind die Formeln (3a), in welchen $\varkappa_1 = \varkappa_2 = 1$ gesetzt worden ist, die Hauptpunkte der Teilsysteme somit an die Stelle der Wahlpunkte treten.

In gewissen Fällen empfiehlt es sich, den Abstand der Teilsysteme vom betreffenden Brennpunkt zu messen, wenn die Brechkraft einen endlichen Wert hat. Ist z. B. das erste Teilsystem durch die Brechkraft D_1 und durch die beiden Brennpunkte, das zweite, wie oben, durch die Brechkraft D_2 und durch zwei Wahlpunkte mit dem Vergrößerungskoeffizienten $\varkappa_2$ bestimmt, und wird der reduzierte Abstand des ersten Wahlpunktes des zweiten Systems vom zweiten Brennpunkt des ersten mit δ_{wf} bezeichnet, so ergibt sich aus weiter unten anzugebenden Formeln

$$\delta_{wf} = \delta - \frac{\varkappa_1}{D_1}$$

und man erhält

$$D_{12} = D_1 \left(\frac{1}{\varkappa_2} - \delta_{wf} D_2 \right) \qquad W_{12} = - \frac{1}{\delta_{wf} D_1{}^2} \qquad \varkappa_{12} = - \varkappa_2 \delta_{wf} D_1 \quad (3c)$$

in welchen Formeln W_{12} den reduzierten Abstand des ersten Wahlpunktes des Vollsystems vom ersten Brennpunkt des ersten Systems darstellt, wenn der zweite Wahlpunkt des Vollsystems mit dem zweiten des zweiten Teilsystems zusammenfällt und $\varkappa_{12}$ den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten angibt. Im Falle $\delta_{wf} = 0$ ergeben die Formeln

$$W'_{12} = \frac{\varkappa_2}{D_2} \qquad \varkappa_{12} = - \frac{D_1}{D_2}$$

den reduzierten Abstand des zweiten Wahlpunktes des Vollsystems vom zweiten Wahlpunkt des zweiten Teilsystems, wenn der erste Brennpunkt des ersten Teilsystems den ersten Wahlpunkt des Vollsystems darstellt, sowie den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten. Wenn zugleich auch $D_2 = 0$ ist, so ist das Vollsystem bekannt, indem der erste bzw. zweite Brennpunkt desselben mit dem ersten Brennpunkt des ersten Teilsystems bzw. mit dem zweiten Wahlpunkt des zweiten zusammenfällt. Ist wiederum das zweite Teilsystem durch die beiden Brennpunkte, das erste durch zwei Wahlpunkte charakterisiert, so gelten die analogen Formeln

$$D_{12} = D_2 (\varkappa_1 - \delta_{fw} D_1) \qquad W'_{12} = \frac{1}{\delta_{fw} D_2{}^2} \qquad \varkappa_{12} = - \frac{\varkappa_1}{\delta_{fw} D_2} \quad (3d)$$

und für $\delta_{fw} = 0$:

$$W_{12} = - \frac{1}{\varkappa_1 D_1} \qquad \varkappa_{12} = - \frac{D_1}{D_2}$$

wo W'_{12} den reduzierten Abstand des zweiten Wahlpunktes des Vollsystems vom zweiten Brennpunkt des zweiten Teilsystems angibt, wenn der erste Wahlpunkt des ersten Teilsystems zugleich der erste Wahlpunkt des Voll-

systems ist, bzw. W_{12} den reduzierten Abstand des ersten Wahlpunktes des Vollsystems vom ersten Wahlpunkt des ersten Teilsystems darstellt, wenn der zweite Wahlpunkt des Vollsystems mit dem zweiten Brennpunkt des zweiten Systems zusammenfällt, und in beiden Fällen der nebenstehende Wert von $\varkappa_{12}$ den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten angibt. Für den reduzierten Abstand δ_{fw} des ersten Brennpunktes des zweiten Teilsystems vom zweiten Wahlpunkt des ersten gilt die Beziehung

$$\delta_{fw} = \delta - \frac{1}{\varkappa_2 D_2}$$

und im Falle $\delta_{fw} = 0$, $D_1 = 0$ fällt der erste bzw. zweite Brennpunkt des Vollsystems mit dem ersten Wahlpunkte des ersten bzw. mit dem zweiten Brennnpunkte des zweiten Teilsystems zusammen.

Wenn beide Teilsysteme endliche Brechkraftwerte haben, und δ_{ff} den Abstand des ersten Brennpunktes des zweiten Systems vom zweiten Brennpunkte des ersten darstellt, so ist

$$\delta_{ff} = \delta - \frac{\varkappa_1}{D_1} - \frac{1}{\varkappa_2 D_2}$$

und man erhält die Formeln

$$D_{12} = -\delta_{ff} D_1 D_2 \qquad \varkappa_{12} = -\frac{D_1}{D_2} \tag{3 e}$$

wo $\varkappa_{12}$ den Vergrößerungskoeffizienten in den Wahlpunkten des Vollsystems darstellt, welche mit dem ersten Brennpunkte des ersten bzw. mit dem zweiten Brennpunkte des zweiten Teilsystems zusammenfallen.

In der physiologischen Optik ist es von Vorteil, die Formeln für die Zusammensetzung von drei Systemen fertig zu haben:

$$D_{13} = D_1 (1-\delta_2 D_3) + D_2 (1-\delta_1 D_1)(1-\delta_2 D_3) + D_3 (1-\delta_1 D_1)$$

$$H_{13} = \frac{\delta_1 (D_{13}-D_1) + \delta_2 D_3}{D_{13}(1-\delta_1 D_1)} \qquad H'_{13} = -\frac{\delta_2 (D_{13}-D_3) + \delta_1 D_1}{D_{13}(1-\delta_2 D_3)} \tag{4}$$

Hier sind also δ_1 δ_2 die reduzierten Abstände der ersten Hauptpunkte des zweiten bzw. dritten Teilsystems von den zweiten Hauptpunkten des ersten bzw. zweiten, H_{13} H'_{13} die reduzierten Abstände der Hauptpunkte des Vollsystems vom ersten Hauptpunkte des ersten, bzw. vom zweiten Hauptpunkte des dritten Teilsystems. In den Fällen, wo das Vollsystem um das mittlere Teilsystem symmetrisch ist, wo also die Identitäten $D_1 = D_3$ und $\delta_1 = \delta_2$ bestehen, erhalten diese Formeln die einfachere Gestalt

$$D_{13} = 2D_1 (1-\delta_1 D_1) + D_2 (1-\delta_1 D_1)^2$$

$$H_{13} = -H'_{13} = \frac{\delta_1}{1-\delta_1 D_1} \tag{4 a}$$

Die Abbildung ist allgemein gleichsinnig oder ungleichsinnig, je nachdem der betreffende Vergrößerungskoeffizient positives oder nega-

tives Vorzeichen hat. Im ersteren Falle liegen zwei ineinander abbildbare Linien auf einer und derselben Seite des Leitstrahls, im letzteren nicht. Da der Leitstrahl stets in der Tangentialebene liegt, so ist der Ausdruck betreffs der zweiten Abbildung nicht mißzuverstehen. In komplizierteren Systemen mit vielen spiegelnden Flächen hat man sich bei der Entscheidung betreffs der ersten Abbildung als in der positiven Richtung im Objekt- und Bildraum blickend vorzustellen.

Die reduzierten Abstände der Haupt- und Brennpunkte von zwei Wahlpunkten findet man, indem man in den Gleichungen (1) $K = 1$ bzw. teils $B = 0$ teils $A = 0$ setzt. Es ergibt sich für den reduzierten Abstand des ersten bzw. zweiten Hauptpunktes vom ersten bzw. zweiten Wahlpunkte

$$\frac{\varkappa - 1}{\varkappa D} \text{ bzw. } \frac{\varkappa - 1}{D}$$

und für die entsprechenden reduzierten Abstände der Brennpunkte

$$-\frac{1}{\varkappa D} \text{ bzw. } \frac{\varkappa}{D}$$

welche Werte der Definition der Brechkraft genügen.

Erstere Werte ergeben sich unmittelbar, wenn man durch Elimination einmal von A, einmal von B aus den Gleichungen (1) denselben die für manche Probleme sehr anwendbare Form

$$(\varkappa - K)\, B = D = A\left(\frac{1}{K} - \frac{1}{\varkappa}\right) \tag{5}$$

gibt, während die letzteren die Brennpunktsgleichungen

$$KD = L \qquad KL' = -D \tag{6}$$

enthalten, wo LL' die im ersten bzw. zweiten Brennpunkte gemessene reduzierte Konvergenz des einfallenden bzw. gebrochenen Strahlenbündels und K den Vergrößerungskoeffizienten in den Fokalpunkten dieser Strahlenbündel darstellen.

Werden die Abbildungsgleichungen auf die Hauptpunkte bezogen, so erhalten dieselben die einfache Form der Hauptpunktsgleichungen

$$B = A + D \qquad KB = A \tag{7}$$

aus welcher hervorgeht, daß die reduzierte Konvergenz eines Strahlenbündels beim Durchgang durch das System um den Betrag der Brechkraft vermehrt wird, und daß die Vergrößerung gleich dem Verhältnis der reduzierten Abstände des Bildes und des Objekts vom bezüglichen Hauptpunkt ist.

Da in einfach asymmetrischen Systemen die den Leitstrahl schneidenden abbildbaren Linien und Bildlinien überall in der Tangentialebene liegen oder die Sagittalebene berühren, so nimmt der im allgemeinen, doppelt asymme-

trischen System definierte anguläre Projektionskoeffizient die Eigenschaften eines angulären Vergrößerungskoeffizienten an. Bei hinreichend kleinem Gegenstande ist der Winkel, unter welchem derselbe gesehen wird, gleich seiner Größe, dividiert mit dem Abstande. Da es sich nun aber empfiehlt, nur mit reduzierten Abständen zu rechnen, so ist es auch vorzuziehen, den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten zu benutzen. Stellt α die Objektgröße, den Abstand zweier abbildbarer Linien von einander dar, β die Bildgröße, so kann die zweite der Gleichungen (1)

$$\varkappa \beta B = \alpha A$$

geschrieben werden. Der reduzierte anguläre Vergrößerungskoeffizient in den beiden durch den linearen Vergrößerungskoeffizienten $\varkappa$ charakterisierten Punkten ist nun das Verhältnis der Winkel βB und αA, welches somit gleich $\frac{1}{\varkappa}$ ist. Allgemein ist demnach das Produkt des linearen und des reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten in beliebigen konjugierten Punkten gleich der Einheit.

Die optische Projektion einer in der Tangential- oder Sagittalebene liegenden Linie auf eine im letzten Medium befindliche Schirmfläche geschieht am einfachsten so, daß sie zuerst auf die erste bzw. zweite Fokalebene des gebrochenen Strahlenbündels projiziert wird, wobei die Vergrößerung durch die betreffenden Vergrößerungskoeffizienten angegeben wird. Sind dann δ', δ'' die reduzierten Abstände der Schirmfläche von den beiden Fokalpunkten, $\mathfrak{B}, \mathfrak{B}''$ die in diesen Punkten gemessene reduzierte Konvergenz des Hauptstrahlenbündels bzw. des dem Projektionszentrum entsprechenden Strahlenbündels in bezug auf die beiden Abbildungen, so verhält sich die Länge der Projektion der Linie auf die den Leitstrahl senkrecht schneidende Schirmfläche zu der Länge ihrer Projektion auf die betreffende Fokalebene wie die Abstände des dem Projektionszentrum konjugierten Punktes von den beiden Flächen, d. h. wie $\left(\frac{1}{\mathfrak{B}} - \delta'\right) : \frac{1}{\mathfrak{B}}$ und man erhält somit allgemein den ersten bzw. zweiten Projektionskoeffizienten C, C'' aus der Formel

$$C = K(1 - \delta' \mathfrak{B}) \tag{8}$$

bei deren Anwendung man von dem Hauptstrahlenbündel bzw. von dem dem Projektionszentrum entsprechenden Strahlenbündel nur die Fokalpunkte im Bildraum zu kennen braucht. Wenn die dem Projektionszentrum im Objekt- und Bildraum konjugierten Punkte schon bekannt sind, mißt man die reduzierte Konvergenz des Objektstrahlenbündels A, A'' in den beiden, dem Projektionszentrum im ersten Medium konjugierten Punkten, läßt δ', δ'' die reduzierten Abstände der Schirmfläche von den beiden im letzten Medium demselben konjugierten Punkten darstellen und bezeichnet die diese beiden Punktpaare charakterisierenden Vergrößerungskoeffizienten mit $\varkappa, \varkappa''$, wonach sich für C, C'' die Formel

$$C = \frac{\delta' A}{\varkappa} \tag{9}$$

aus den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten ergibt.

Wenn die zu projizierende Linie nicht in der Tangential- oder Sagittalebene, wohl aber in einer auf dem Leitstrahl senkrecht stehenden Ebene liegt, so projiziert man sie zuerst auf die beiden Schnittlinien dieser Ebene mit der Tangential- und Sagittalebene, wonach diese beiden Projektionen unter Anwendung der Projektionskoeffizienten $C, C_{,,}$ auf die auf dem Leitstrahl senkrecht stehende Sehirmebene projiziert werden. Sind $\omega\,\omega'$ die Winkel, welche die Linie bzw. die Projektion derselben mit der Tangentialebene bilden, und stellt C_1 den linearen Projektionskoeffizienten dar, so ergibt sich auf diese Weise:

$$\operatorname{tg}\omega' = \frac{C_{,,}}{C_{,}}\operatorname{tg}\omega \qquad C_1 = C_{,}\frac{\cos\omega}{\cos\omega'} = C_{,,}\frac{\sin\omega}{\sin\omega'} \tag{10}$$

Endlich hat man in den Fällen, wo die Objekt- und Sehirmfläche nicht senkrecht auf dem Leitstrahl stehen, sondern ihre Tangentialebenen mit den den Leitstrahl senkrecht schneidenden Ebenen die Winkel w w' bilden, in den Formeln (10) für C, den Wert $C_{,}\frac{\cos w}{\cos w'}$ zu setzen, um die aktuelle Vergrößerung bei der Projektion und die Neigung der projizierten Linie zu erhalten. Daß beide Flächen die Tangentialebene senkrecht schneiden müssen, liegt im Begriffe des einfach asymmetrischen Abbildungssystems.

Durch die optische Projektion erhält man nicht nur den Limeswert der Größe, sondern auch den der Unschärfe der Projektion für unendlich abnehmende Blendengröße, ersteren durch Projektion des Objektes mit dem Blendenzentrum als Projektionszentrum, letzteren durch Projektion der Blende mit dem zentralen Objektpunkte als Projekionszentrum. Wenn bei der Projektion der Blende bzw. des Objektes die Projektionskoeffizienten mit C_p bzw. C_0 bezeichnet werden, so ergeben die Formeln (8) und (9):

$$C_p = \varkappa(1 - \delta' B) \qquad C_o = \frac{\delta' A}{\varkappa} \tag{11}$$

wo somit $\varkappa$, $\varkappa_{,,}$ die Vergrößerungskoeffizienten in den Fokalpunkten des Hauptstrahlenbündels im Sehirm- und Objektraum B, $B_{,,}$ A, $A_{,,}$ die in diesen Punkten gemessenen reduzierten Konvergenzen des Objektstrahlenbündels und $\delta', \delta'_{,,}$ die reduzierten Abstände der Sehirmfläche von den beiden erstgenannten Punkten darstellen.

Stellen nun im Objektraum $R, R_{,,}$ die in den Fokalpunkten des Hauptstrahlenbündels gemessenen reduzierten Konvergenzen eines Strahlenbündels dar, welches sowohl einen tangentialen wie einen sagittalen Fokalpunkt auf der Sehirmfläche hat, und sind $K, K_{,,}$ die Vergrößerungskoeffizienten in diesen Fokalpunkten, so hat man laut der ersten der Gleichungen (1):

$$\frac{\varkappa^2}{\delta'} = \varkappa D + R \qquad \varkappa^2 B = \varkappa D + A$$

Die Subtraktion der zweiten dieser Gleichungen von der ersten ergibt einen Wert für $1-\delta' B$, welcher in den Ausdruck für C_p eingesetzt wird; man erhält auf diese Weise:

$$C_p = \frac{\delta'}{\varkappa}(R - A) \qquad C_p + C_o = \frac{\delta' R}{\varkappa} = K \qquad (12)$$

aus welchen, unten anzuwendenden Formeln u. a. hervorgeht, daß die Summe der beiden Projektionskoeffizienten nur vom optischen System und der Schirmlage, nicht aber von der Objektentfernung abhängig ist.

Wenn das optische System als Ganzes ein Umdrehungssystem darstellt, in welchem die Abbildung längs schief einfallenden Leitstrahlen untersucht wird, so erhält man schon bei der trigonometrischen Konstruktion des Leitstrahls die sagittalen Vergrößerungs- und Projektionskoeffizienten, welche das Verhältnis der Achsenabstände der betreffenden Punkte darstellen. Im Hauptstrahlenbündel sind außerdem die sagittalen Fokalpunkte bekannt, da dieselben in den verschiedenen Medien mit den Schnittpunkten des Leitstrahls mit der Achse zusammenfallen.

Wenn das gebrochene Strahlenbündel, sei es in diesem Sonderfalle oder im allgemeinen Falle, anastigmatisch ist, so daß eine punktuelle Abbildung des zentralen Objektpunktes und der nächsten Umgebung desselben stattfindet, so haben dennoch die beiden Vergrößerungskoeffizienten allgemein verschiedene Werte, so daß das Bild nicht objektähnlich ist. Um das Bild einer schief auf der Tangentialebene stehenden Linie zu finden, hat man in den Formeln (10) die Vergrößerungskoeffizienten anstatt der Projektionskoeffizienten einzusetzen. In der Terminologie der Theorie der kollinearen Abbildung wird die durch die Verschiedenheit der Vergrößerungskoeffizienten bedingte Erscheinung, die jedoch den allgemeinen Fall repräsentiert, als anamorphotische Abbildung bezeichnet.

Im **symmetrischen Abbildungssystem** gelten dieselben Formeln, welche dadurch vereinfacht werden, daß Einfalls- und Brechungswinkel gleich Null, ihre Kosinus gleich eins gesetzt werden. Es wird die eine der beiden Symmetrieebenen willkürlich als die erste bezeichnet, und es empfiehlt sich, um Verwechslungen vorzubeugen, allgemein die Bezeichnungen A_1 A_2 anstatt A_1 A_2 usw. zu benutzen. Auch in diesen Systemen haben die beiden Vergrößerungskoeffizienten bei anastigmatischer Strahlenbrechung im allgemeinen Falle verschiedene Werte.

Im **achsensymmetrischen Abbildungssystem** hat man endlich nur mit einer Abbildung zu rechnen, nämlich der von Parallelkreisen, so daß überall nur eine Brechkraft, eine reduzierte Konvergenz aus den Formeln erhalten wird. Bei der Abbildung findet in der nächsten Umgebung des zentralen Objektpunktes eine punktuelle Korrespondenz statt, und bei stetig gegen Null abnehmender Objektgröße wird das Bild stetig objektähnlicher, um im Augenblick des Überganges zur Grenze vollständig objektähnlich zu werden. In diesen Systemen pflegt das im Objekt- bzw. Bildraum der Blende konjugierte Bild als Eintritts- bzw. Austrittspupille bezeichnet zu werden.

Da immer nur ein Vergrößerungskoeffizient bei der Abbildung existiert, so kann in diesen Systemen nur von einer gleichsinnigen und einer ungleich-

sinnigen Abbildung im Sinne der oben gegebenen Definition die Rede sein. Erstere wird gewöhnlich aufrecht, letztere umgekehrt genannt. Beide sind, wenn man Objekt und Bild in derselben Richtung auf der Achse sieht, rechtwendig, sonst rückwendig, Begriffe, welche somit nichts mit dem Wesen der Abbildung zu tun haben, wohl aber für die Beobachtung der optischen Bilder von Bedeutung sein können.

Als **Beispiel** der Anwendung der oben gegebenen Formeln soll hier ein weiter unten des näheren zu berücksichtigendes Problem gelöst werden. Es sei ein achsensymmetrisches, aus brechenden Flächen zusammengesetztes System mit der Brechkraft D gegeben und es mögen HH' die reduzierten Abstände der Hauptpunkte desselben von der ersten bzw. letzten Fläche, $\varrho\varrho'$ die Krümmungsradien dieser Flächen, nn' die Brechungsindizes von Objekt- und Bildraum darstellen. Das vom Objektraum kommende Licht wird in der letzten Fläche teilweise reflektiert. Von diesem reflektierten Lichte gelangt ein Teil zurück zur ersten Fläche, wo wieder eine teilweise Spiegelung stattfindet, so daß von diesem Lichte schließlich wiederum ein Teil in den Bildraum gelangt. Es soll nun die durch dieses zweimal gespiegelte Licht bewirkte optische Abbildung untersucht werden.

Um mit den gegebenen Daten dies Ziel zu erreichen, hat man am bequemsten den von Helmholtz betreffs der Untersuchung der hinteren Linsenfläche des Auges eingeschlagenen Weg zu befolgen. Da in einem unendlich dünnen, aus zwei brechenden Flächen bestehenden System allgemein der Einfallswinkel in der zweiten Fläche gleich dem Brechungswinkel in der ersten ist, sobald die Krümmungsmittelpunkte der Flächen zusammenfallen, so ergibt sich aus den Formeln (3), daß ein solches System sowohl für die tangentiale wie für die sagittale Abbildung afokal mit dem Vergrößerungskoeffizienten eins ist, und die bei unendlich kleinem Abstande der beiden Flächen zusammenfallenden Inzidenzpunkte sind einander konjugiert. Wiederum ergeben die Formeln (3), daß bei der Zusammensetzung eines solchen Systems mit einem beliebigen anderen das Vollsystem die Eigenschaften des letzteren unverändert behält. Es folgt hieraus, daß allgemein in einem beliebigen Punkte eines optischen Systems eine unendlich dünne, in bezug auf beide Abbildungen konzentrische Schicht eines beliebigen Mediums eingefügt werden kann, ohne daß die Abbildung dadurch verändert wird.

Wenn nun eine solche unendlich dünne mit der ersten bzw. letzten Fläche konzentrische, aus dem ersten bzw. letzten Medium bestehende Schicht in unendlich kleinem Abstande von der betreffenden Fläche im zweiten bzw. vorletzten Medium gelegt wird, so besteht also das zu untersuchende System aus 5 Einzelsystemen, von denen die mit ungerader Ordnungszahl mit dem ursprünglichen System identisch sind, während das zweite bzw. vierte durch eine im letzten bzw. ersten Medium belegene spiegelnde Fläche mit dem Krümmungsradius der letzten bzw. ersten Fläche des ursprünglichen Systems dargestellt wird. Zunächst werden die drei ersten Teilsysteme unter Anwendung der Formeln (4a) zusammengesetzt, indem

$$D_1 = D \qquad D_2 = -\frac{2n'}{\varrho'} \qquad \delta = -H'$$

zu setzen ist. Es ergibt sich

$$D_{13} = 2D(1 + H'D) - \frac{2n'}{\varrho'}(1 + H'D)^2$$

$$H_{13} = -H'_{13} = -\frac{H'}{1 + H'D}$$

Dann wird dieses System mit den beiden folgenden unter Anwendung der Formeln (4) zusammengesetzt. Hierbei ist zu bemerken, daß H'_{13} der reduzierte Abstand des zweiten Hauptpunktes des Systems 13 vom zweiten Hauptpunkt des Systems 3 ist, und daß, da der betreffende Brechungsindex gleich — n ist, H den reduzierten Abstand der spiegelnden Fläche (System 4) vom zweiten Hauptpunkte des Systems 3 darstellt, daß somit $H - H'_{13}$ der reduzierte Abstand dieser Fläche vom zweiten Hauptpunkt des Systems 13 ist. In den Gleichungen (4) hat man somit für bzw.

	D_1	D_2	D_3	δ_1	δ_2
zu setzen:	D_{13}	$\frac{2n}{\varrho}$	D	$H - H'_{13}$	H

wonach die Brechkraft D_{15} des untersuchten Systems sowie die reduzierten Abstände $H + H_{13} + H_{15}$ bzw. $H' + H'_{15}$ der Hauptpunkte desselben von der ersten bzw. letzten Fläche bekannt sind.

3. Die Abbildungsgesetze höherer Ordnung.

Im einfach asymmetrischen System habe ich für homogene Medien die vollständigen **Abbildungsgesetze zweiter Ordnung** deduziert. Durch die betreffenden Formeln ergeben sich zunächst zwei Asymmetrienwerte, welche die Güte der Strahlenvereinigung bestimmen, dann die Neigung der beiden Bildflächen zum Leitstrahl sowie in den Schnittpunkten desselben mit diesen Flächen die Krümmung der abbildbaren Linie und der Bildlinie des ersten Systems und die Krümmung der orthogonalen Trajektorien der abbildbaren Linien und der Bildlinien des zweiten Systems, endlich auch drei, den Grad und die Art der Objektunähnlichkeit der Bilder — die Distorsion — bestimmende Asymmetrienwerte. Hier soll nur die Strahlenvereinigung kurz besprochen werden.

Geht man in der Symmetrieebene eines einfach asymmetrischen Strahlenbündels unaufhörlich auf nächstliegende Strahlen über, so bilden die ersten Fokalpunkte auf den verschiedenen Strahlen zusammen eine krumme Linie, welche von den Strahlen berührt wird, die Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche mit der Symmetrieebene, während die von den zweiten Fokalpunkten gebildete Schnittlinie mit der zweiten kaustischen Fläche überall, wo das Strahlenbündel astigmatisch ist, endliche Winkel mit den Strahlen bildet. Es mag nun allgemein der erste bzw. zweite Fokalabstand mit τ bzw. ς und erstere bzw. letztere Schnittlinie als τ- bzw. ς-Linie bezeichnet werden. Die Fig. 1 veranschaulicht das Verhalten dieser Linien zu dem Hauptstrahle

OF, $F_{„}$ mit den beiden Fokalpunkten F, $F_{„}$. Der Krümmungsradius AF, der τ-Linie im ersten Fokalpunkte wird mit R bezeichnet und stellt den direkten Asymmetrienwert des Strahlenbündels längs dem betreffenden Strahle dar. Wird wiederum im zweiten Fokalpunkte die Linie $BF_{„}$ senkrecht zur Tangente der ς-Linie gezogen, so ist der Abstand BF, des Schnittpunktes derselben mit der ersten Fokalebene vom ersten Fokalpunkte der transversale Asymmetrienwert des Strahlenbündels längs dem betreffenden Strahl und wird mit S bezeichnet. Hierdurch sind auch die Vorzeichen der Asymmetrienwerte bestimmt, so daß in dem in der Figur dargestellten Fall beide positiv sind, wenn die Richtung nach oben die positive ist. Das

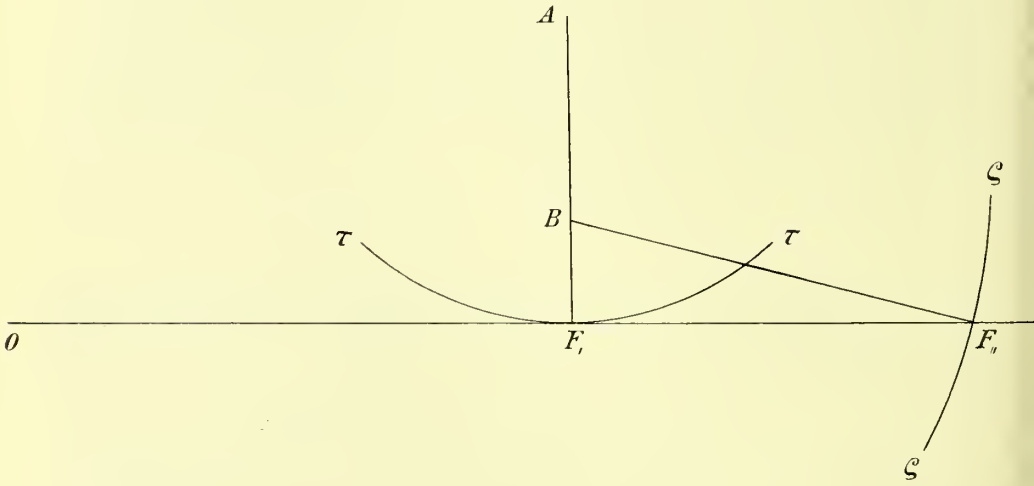


Fig. 1.

Vorzeichen der Brennstrecke E und des Winkels ϑ, den die ς-Linie mit der zweiten Fokalebene bildet, ergibt sich aus den definierenden Gleichungen

$$E = \varsigma - \tau \qquad S = - E \operatorname{tg} \vartheta$$

Die Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche mit der ersten Fokalebene hat die Krümmung $-\frac{S}{E^2}$, indem der Krümmungsmittelpunkt im Schnittpunkte der Linie' AF, mit der in $F_{„}$ gezogenen Tangente der ς-Linie liegt. Wenn beide Asymmetrienwerte dasselbe Vorzeichen haben, hat diese Fläche somit eine sattelförmige Krümmung, und bei zunehmenden Asymmetrienwerten wird diese Form mehr rinnenähnlich, da der Krümmungsradius der τ-Linie immer größer, die Krümmung der Schnittlinie mit der ersten Fokalebene immer schärfer wird.

Die zweite kaustische Fläche hat, da sie in bezug auf die Tangentialebene symmetrisch ist, in der ς-Linie eine Kante. Die Schnittlinie derselben mit der Sagittalebene hat somit im zweiten Fokalpunkt eine Spitze, in welcher ihre zwei in derselben zusammenlaufenden Zweige einander berühren. Auf

dieselbe Weise verhält sich, sobald nicht $\vartheta = 0$ ist, die Sehnittlinie mit der zweiten Fokalebene.

Wenn das Strahlenbündel längs einem Strahle anastigmatisch ist, so haben die beiden kaustichen Fläehen desselben im betreffenden Fokalpunkte einen Berührungspunkt miteinander, wie es die Fig. 2 darstellt. Der Krümmungsradius der τ-Linie ist, wie im allgemeinen Falle gleich R, die Krümmung der ς-Linie gleich

$$-\frac{R - 2S}{S^2}$$

und der in der Fig. 2 repräsentierte Fall ist somit dadurch eharakterisiert, daß R und R — 2 S dasselbe Vorzeiehen haben. In den in der physiologisehen Optik gewöhnlich vorkommenden Fällen haben beide Asymmetrienwerte gleiehe Vorzeichen und ist der direkte Asymmetrienwert numerisch größer als der transversale. In diesen Fällen schneiden beide kaustisehen Fläehen die Fokalebene, indem ihre Sehnittlinien in einer Spitze zusammen-

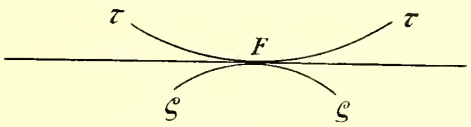


Fig. 2.

fallen. Die Tangenten der beiden in der Spitze zusammenlaufenden Zweige der Sehnittlinien berühren einander aber nieht, sondern schließen einen spitzen Winkel ein, wodureh am entspreehenden Quersehnitte des Strahlenbündels ein eharakteristiseh.es pfeilspitzenähnliches Aussehen entsteht.

Hiermit sind in den wesentlichen Zügen die exakten Beziehungen der Strahlenvereinigung im einfach asymmetrisehen Strahlenbündel zu den dasselbe längs dem betreffenden Strahle charakterisierenden Asymmetrienwerten gegeben. Man kann aber aueh zwei die Wellenfläche ehrakterisierende Werte U W wählen, die dureh die Gleiehungen

$$U = \frac{R}{\tau^3} \qquad W = \frac{S}{\tau\varsigma^2}$$

erhalten werden, und welche die direkte bzw. transversale Krümmungsasymmetrie der Fläche im betreffenden Punkte darstellen. Während allgemein die Werte R S in den Strahlenbündeln angewendet werden, eignen sieh die Werte U W besser zum Charakterisieren der brechenden Fläehen des Abbildungssystems.

Diese Werte stellen aueh Differentialquotienten der Funktionen dar, dureh welehe die Fokalabstände und lateralen Abweiehungen im Strahlenbündel und die Hauptkrümmungen der Fläehe von der Strahlenneigung bzw. vom Abstande des Fläehenpunktes abhängig sind, und können als solehe zu einer Serienentwieklung benutzt werden, welche ihre Bedeutung versinnlieht. Im Strahlenbündel seien $\tau_0\, \varsigma_0$ die von der Wellenfläehe gemessenen Fokalabstände auf dem Hauptstrahl, $\tau\, \varsigma$ diejenigen auf einem be-

liebigen anderen Strahle, u v die Winkel, welche dieser Strahl mit der den Hauptstrahl enthaltenden Sagittalebene bzw. mit der Tangentialebene bildet, und $\xi\eta$ die Abstände der Schnittpunkte desselben Strahles mit der ersten bzw. zweiten Fokalebene von der Sagittal- bzw. Tangentialebene, während auf einer brechenden Fläche $\varrho_{0'}$ $\varrho_{0''}$ die Krümmungsradien im Inzidenzpunkte des Leitstrahls, $\varrho_{'}$ $\varrho_{''}$ diejenigen in einem anderen Punkte darstellen, dessen Entfernung von der im Inzidenzpunkte senkrecht auf der Tangentialebene stehenden Linie gleich σ ist. Die betreffenden Serien sind

$$\tau = \tau_0 - \mathrm{Ru} + \cdots \qquad \varsigma = \varsigma_0 - \mathrm{Su} + \cdots$$

$$\xi = -\frac{1}{2}(\mathrm{Ru}^2 + \mathrm{Sv}^2) + \cdots \qquad \eta = -\mathrm{Suv} + \cdots$$

$$\frac{1}{\varrho_{'}} = \frac{1}{\varrho_{0'}} + \mathrm{U}\sigma + \cdots \qquad \frac{1}{\varrho_{''}} = \frac{1}{\varrho_{0''}} + \mathrm{W}\sigma + \cdots$$

und es stellen $\xi\eta$ die erste bzw. zweite laterale Abweichung des betreffenden Strahles dar. Wie ersichtlich, haben die Winkel u v bei positiven Fokalabständen dasselbe Vorzeichen wie die bezüglichen Koordinaten des Punktes, in welchem der Strahl die Wellenfläche schneidet. Diese Serien sind aber nur bei kleiner Blendenöffnung geeignet, anwendbare Annäherungswerte zu geben, während die dargestellten geometrischen Beziehungen von der Blendenöffnung unabhängig sind. Die von den Asymmetrienwerten abhängigen Abweichungen tragen in der Literatur der physikalischen Optik, wo sie aber bisher keine korrekte Darstellung gefunden haben, den Namen Koma.

Stellt das einfach asymmetrische Abbildungssystem einen Teil eines achsensymmetrischen optischen Systems dar, so ergeben sich verschiedene Vereinfachungen. Die Krümmung der abbildbaren Linien und Bildlinien des ersten Systems, welche zugleich orthogonale Trajektorien derjenigen des zweiten Systems sind, ergibt sich aus dem Achsenabstand, die drei die Distorsion bestimmenden Asymmetrienwerte sind voneinander abhängig, so daß es genügt, einen derselben zu kennen, den Asymmetrienwert des ersten Vergrößerungskoeffizienten, welcher besagt, um wieviel dieser Koeffizient beim Übergang auf einen nächstliegenden Objektpunkt verändert wird, und endlich ist auch die transversale Asymmetrie im Hauptstrahlenbündel, sowie die transversale Krümmungsasymmetrie der brechenden Flächen durch die betreffenden Fokalabstände p q bzw. die Krümmungsradien und durch den Neigungswinkel ϑ des Leitstrahls bzw. der Flächennormale zur achsensenkrechten Ebene bekannt, indem die Formeln

$$\mathrm{S} = -(\mathrm{q}-\mathrm{p})\,\mathrm{tg}\vartheta \qquad \mathrm{W} = -\frac{(\varrho_{''} - \varrho_{'})\,\mathrm{tg}\vartheta}{\varrho_{'}\,\varrho_{''}{}^2}$$

daraus resultieren, daß die zweite kaustische Fläche des Hauptstrahlenbündels und die zweite Krümmungsmittelpunktsfläche der brechenden Flächen auf die Umdrehungsachse zusammenschrumpft.

Die früher nur im achsensymmetrischen Abbildungssystem bekannten **Abbildungsgesetze dritter Ordnung** habe ich für symmetrische Systeme mit

homogenen Medien vollständig deduziert. Durch die bezüglichen Formeln erhält man vier die Güte der Strahlenvereinigung bestimmende Aberrationswerte, ebensoviele Variationskoeffizienten der Asymmetrienwerte, welche die Strahlenvereinigung in nächstliegenden Strahlenbündeln definieren, zwei, jedoch voneinander abhängige Distorsionswerte der Bildlinien, die zwei Hauptkrümmungen der beiden Bildflächen und endlich vier Distorsionswerte der Vergrößerungskoeffizienten. Hier soll wiederum nur kurz die Strahlenvereinigung besprochen werden.

Die vier Aberrationswerte werden mit $A_1\, G_1\, G_2\, A_2$ bezeichnet, und es stellen $A_1\, G_2$ die dirckte bezw. transversale Aberration im ersten Hauptschnitt dar, während $A_2\, G_1$ dieselbe Bedeutung für den zweiten haben. Da die Hauptschnitte Symmetrieebenen darstellen, so haben beide kaustischen Flächen Kanten, welche in den ungleichnamigen Hauptschnitten liegen, und weisen ihre Schnittlinien mit den gleichnamigen Hauptschnitten in den betreffenden Fokalpunkten Spitzen auf. Diese Schnittlinien stellen die τ-Linien der

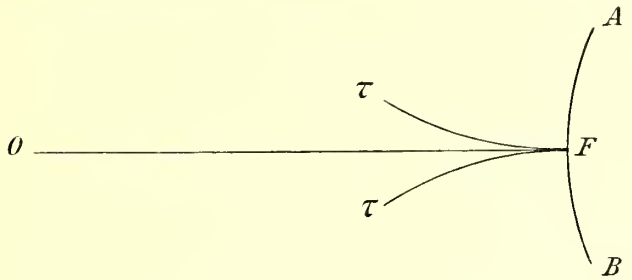


Fig. 3.

in den gleichnamigen Hauptschnitten, die Kanten aber die ς-Linien der in den ungleichnamigen Hauptschnitten verlaufenden Strahlen dar. Die Fig. 3 zeigt eine solche Schnittlinie mit ihrer Evolute A F B, welche die Krümmungsmittelpunkte derselben enthält. Der Krümmungsradius dieser Evolute im Fokalpunkt F ist eben der betreffende direkte Aberrationswert, während die Krümmung der Kante der ersten bzw. zweiten kaustischen Fläche gleich ist

$$-\frac{G_2}{E^2} \text{ bzw. } -\frac{G_1}{E^2}$$

wo, wie früher, E die Brennstrecke darstellt. Für letztere gilt die Beziehung

$$G_1 - G_2 = E = s_2 - s_1$$

wo die Fokalabstände mit $s_1\, s_2$ bezeichnet worden sind.

Ist das symmetrische Strahlenbündel längs der Schnittlinie der beiden Symmetrieebenen anastigmatisch, so fallen somit die beiden transversalen Aberrationswerte zusammen. Dabei haben nicht nur die τ-Linien sondern auch die ς-Linien Spitzen im Fokalpunkt. Der Krümmungsradius der Evolute der letzteren ist

$$\frac{4\,G^3}{(A - 3\,G)^2}$$

wo für A der direkte Aberrationswert in dem die ς-Linie enthaltenden Hauptschnitt einzusetzen ist. Diejenige Form dieser Strahlenbündel, welche für die physiologische Optik von Bedeutung ist, läßt sich dadurch charakterisieren, daß sämtliche Aberrationswerte dasselbe Vorzeichen haben und in beiden Hauptschnitten der direkte Aberrationswert numerisch größer als der transversale ist. In solchen Fällen verlaufen die beiden τ-Linien auf der ersten, die beiden ς-Linien auf der zweiten kaustischen Fläche, beide Flächen liegen auf einer und derselben Seite der Fokalebene, und von den Schnittlinien derselben mit einer zu dieser Ebene parallelen Ebene stellt diejenige der ersteren eine geschlossene Linie ohne Spitzen dar, während diejenige der letzteren vier, zu je zweien in den Symmetrieebenen liegende Spitzen hat und außerdem, wie die Fig. 4 zeigt, noch vier Spitzen haben kann. Die zweite kaustische Fläche hat somit immer zwei mit den ς-Linien zusammenfallende, durch den Fokalpunkt gehende Kanten und kann außerdem noch zwei solche Kanten haben. Letzteres ist bei gleichem Vorzeichen der Differenzen $A_1 - 3G$ und $A_2 - 3G$ der Fall.

Von besonderer Bedeutung für die physiologische Optik ist die Differenz $A_1 - A_2$, der Astigmatismus der Aberration und in den Fällen, wo dieser sehr klein oder gleich Null ist, die Differenz $A_1 + A_2 - 6G$, der Diagonalastigmatismus der Aberration. Wenn sowohl der Astigmatismus wie der Diagonalastigmatismus der Aberration gleich Null ist, können Symmetrieebenen in größerer Anzahl vorhanden sein, wobei auch Kanten in größerer Anzahl auf der zweiten kaustischen Fläche verlaufen und ein zur Fokalebene paralleler Schnitt derselben eine größere Anzahl nach dem Schema der Fig. 4 angeordneter Spitzen aufweist.

Fig. 4.

Die brechenden Flächen werden im Inzidenzpunkte durch vier Abflachungswerte $\Phi_1\ \Omega_1\ \Omega_2\ \Phi_2$ charakterisiert, von denen $\Phi_1\ \Omega_2$ die direkte bzw. transversale Abflachung im ersten Hauptschnitte messen, $\Phi_2\ \Omega_1$ dieselbe Bedeutung für den zweiten Hauptschnitt haben. Zwischen den beiden transversalen Abflachungswerten besteht die Beziehung

$$\Omega_1 - \Omega_2 = \frac{1}{\varrho_1\,\varrho_2}\left(\frac{1}{\varrho_1} - \frac{1}{\varrho_2}\right)$$

wo $\varrho_1\ \varrho_2$ die Krümmungshalbmesser der Fläche sind. Die Beziehungen der Abflachungswerte der Wellenfläche zu den Aberrationswerten des Strahlenbündels sind

$$\Phi_1 = \frac{A_1}{s_1^{\,4}} \qquad \Omega_1 = \frac{G_1}{s_1^{\,2} s_2^{\,2}} \qquad \Omega_2 = \frac{G_2}{s_1^{\,2} s_2^{\,2}} \qquad \Phi_2 = \frac{A_2}{s_2^{\,4}},$$

Die Vorzeichen der Aberrationswerte ergeben sich aus den gegebenen Definitionen, die der Abflachungswerte aus letzteren Gleichungen. So ist z. B. immer der direkte Aberrationswert positiv, wenn die Spitze in die positive Richtung schaut, der direkte Abflachungswert, wenn der betreffende

Krümmungsradius im Inzidenzpunkte ein Maximum hat. Man muß sich aber hierbei erinnern, daß ein Maximum bei negativem Werte einem numerischen Minimum entspricht.

Die Bedeutung der Aberrationswerte für die Strahlenvereinigung wird auf folgende Weise durch Serienentwickelung veranschaulicht. Es seien s_{01} s_{02} die Fokalabstände auf dem Hauptstrahle, s_1 s_2 diejenigen auf einem beliebigen anderen Strahle, welcher die Winkel w_1 w_2 mit der zweiten bzw. ersten Symmetrieebene bildet, ξ η die erste bzw. zweite laterale Abweichung des Strahles, und es seien wiederum ϱ_{01} ϱ_{02} die Krümmungsradien der brechenden Fläche im Inzidenzpunkte, ϱ_1 ϱ_2 diejenigen in einem anderen beliebigen Punkte, dessen Abstände von der zweiten bzw. ersten Symmetrieebene mit σ_1 σ_2 bezeichnet werden. Die Serien

$$s_1 = s_{01} - \frac{A_1 w_1^2}{2} - \frac{G_1 w_2^2}{2} + \ldots \qquad s_2 = s_{02} - \frac{G_2 w_1^2}{2} - \frac{A_2 w_2^2}{2} + \ldots$$

$$\xi = -\frac{A_1 w_1^3}{6} - \frac{G_2 w_1 w_2^2}{2} + \ldots \qquad \eta = -\frac{G_1 w_1^2 w_2}{2} - \frac{A_2 w_2^3}{6} + \ldots$$

$$\frac{1}{\varrho_1} = \frac{1}{\varrho_{01}} + \Phi_1 \frac{\sigma_1^2}{2} + \Omega_1 \frac{\sigma_2^2}{2} + \ldots \qquad \frac{1}{\varrho_2} = \frac{1}{\varrho_{02}} + \Omega_2 \frac{\sigma_1^2}{2} + \Phi_2 \frac{\sigma_2^2}{2} + \ldots$$

gelten dann für nächstliegende Strahlen bzw. Flächenpunkte und geben bei hinreichend enger Blende anwendbare Annäherungswerte.

Im achsensymmetrischen Abbildungssystem ergeben sich wesentliche Vereinfachungen. Die direkte Aberration ist in allen Meridianschnitten gleich und beträgt das Dreifache der transversalen; auf dieselbe Weise reduzieren sich die Variationskoeffizienten der Asymmetrienwerte zu einem einzigen, was auch mit den Distorsionswerten der Vergrößerungskoeffizienten der Fall ist. Da abbildbare Linien und Bildlinien Parallelkreise und Meridianlinien darstellen, so kommen auch die beiden Distorsionswerte der Bildlinien in Wegfall, und endlich hat man nur mit einer Krümmung jeder Bildfläche zu rechnen. Der Variationskoeffizient der Asymmetrienwerte trägt in der Literatur der physikalischen Optik den Namen Koma bei unendlich kleiner Strahlneigung, wobei öfters dieser wesentliche Zusatz vergessen wird. Die obenstehenden Serien nehmen die Form

$$s = s_0 - \frac{A w^2}{2} + \ldots \qquad \xi = -\frac{A w^3}{6} + \ldots \qquad \frac{1}{\varrho} = \frac{1}{\varrho_0} + \Phi \frac{\sigma^2}{2} + \ldots$$

an, in welcher sämtliche Werte für eine beliebige Meridianebene gelten.

4. Die Untersuchung weit geöffneter Strahlenbündel.

Auf dieselbe Weise wie die Abbildung einer räumlich ausgedehnten Fläche durch ein optisches System nur durch wiederholte Untersuchungen einzelner Abbildungssysteme, d. h. nur in der nächsten Umgebung ausgewählter Leitstrahlen bekannt gemacht werden kann, so verhält sich auch die Untersuchung der Strahlenvereinigung in weit geöffneten Strahlenbündeln. Während

aber erstere Untersuchung wegen der geringen Ausdehnung des scharfen Bildfeldes im Auge und wegen der Bewegungen desselben beim Sehen keine Bedeutung für die Abbildung im Auge hat, sondern nur für die Abbildung in optischen Instrumenten, welche mit demselben kombiniert werden, so ist letztere Untersuchung von fundamentaler Bedeutung für die Kenntnis des im Auge entstehenden optischen Bildes. Man hat hierbei allgemein die Fokalabstände und die Asymmetrienwerte längs so vielen endlich geneigten Strahlen zu berechnen, wie es die Genauigkeit der zu erzielenden Kenntnis von der Strahlenvereinigung erforderlich macht.

Am einfachsten gestaltet sich diese Untersuchung im achsensymmetrischen Strahlenbündel. Es empfiehlt sich hierbei, den Neigungswinkel w eines Strahles gegen den Achsenstrahl bei konvergentem Lichte als positiv zu rechnen. Aus den Serien

$$R = A\,w + \ldots \qquad S = \frac{A\,w}{3} + \ldots$$

ergibt sich dann, daß bei positivem Fokalabstande — die folgende Untersuchung soll auf diesen Fall beschränkt werden — die Asymmetrienwerte längs unendlich wenig geneigten Strahlen stets das Vorzeichen des Aberrationswertes haben. Aus der Fig. 3 ist es sofort ersichtlich, daß dies für das ganze Strahlenbündel im allgemeinen Falle gilt. (Diese Fig. repräsentiert nach der Nomenklatur der technischen Optik den Fall nicht korrigierter sphärischer Aberration.) Wenn nämlich ein Strahl als Tangente des einen Zweiges der τ-Linie konstruiert wird, so ist laut der Definition des Neigungswinkels der Krümmungsmittelpunkt dieser Linie im Berührungspunkte auf der positiven Seite des Strahles belegen, wenn die Lichtbewegung von links nach rechts erfolgt, auf der negativen, wenn das Licht von rechts nach links geht. Da der Aberrationswert im ersteren Falle positiv, im letzteren negativ ist, so verhält sich demnach der direkte Asymmetrienwert auf dieselbe Weise. Daß aber die beiden Asymmetrienwerte dasselbe Vorzeichen haben, geht schon daraus hervor, daß die achsensenkrechte Schnittlinie der kaustischen Fläche einen Kreis darstellt, dessen Mittelpunkt auf der Achse liegt, die Fläche somit konvexkonkav (sattelförmig gekrümmt) ist. Da nur auf der kaustischen Fläche Schnittpunkte nächstliegender Strahlen vorkommen, so sieht man die Schnittlinie derselben als helle Linie auf einem Strahlenbündelquersehnitt, welcher durch passende Anbringung einer Schirmfläche erhalten wird. Schreitet man mit der achsensenkrechten Schirmebene in der Richtung der Lichtbewegung fort, so findet man bei positiver Aberration, daß die zuerst auftretende Schnittlinie der kaustischen Fläche mit der Begrenzungslinie des Strahlenbündelquersehnittes zusammenfällt. Dieses Verhalten findet statt, bis die Schirmlage den Ort des dünnsten Querschnittes des Strahlenbündels erreicht hat, wo die äußersten Strahlen die kaustische Fläche sehneiden. In der Fig. 3 erhält man diesen Ort, wenn man die Tangente der τ-Linie in einem ihrer Endpunkte zieht. Von nun an wird der Strahlenbündelquersehnitt auf jeder folgenden Schirmlage immer größer, während der Querschnitt der kaustischen Fläche fortwährend kleiner wird, um schließlich in den axialen Fokalpunkt zusammenzuschrumpfen. Die negative

Aberration unterscheidet sich von der positiven nur durch die umgekehrte Reihenfolge der Querschnitte der kaustischen Fläche.

Eine andere Methode, die Aberration in diesen einfachen Fällen zu untersuchen, besteht in der Verschiebung eines kleinen Loches auf dem axialen Strahl, während man durch dasselbe in der Richtung nach der Lichtquelle blickt. Wenn diese Verschiebung in der Richtung der Lichtbewegung erfolgt, so daß das Loch anfangs nahe der Öffnung des Strahlenbündels gehalten wird, so sieht man zunächst nur einen kleinen kreisförmigen hellen Fleck im Zentrum der Öffnung, da nur die zentralen Strahlen durch das Loch dringen können. Werden dabei kleine seitliche Bewegungen mit dem Loch gemacht, so ist der Achsenabstand der Strahlen, welche durch das Loch gehen, immer von demselben Vorzeichen wie der Achsenabstand des Loches, weil sich die Strahlen nicht zwischen der Öffnung und dem Loche geschnitten haben, und es macht also der Lichtfleck scheinbar eine mit der Bewegung des Loches gleichsinnige Bewegung in der Öffnung. Dieses Verhalten bleibt unverändert dasselbe, bis die Lochebene die kaustische Fläche schneidet. Hier soll nur die charakteristische Erscheinung erwähnt werden, welche auftritt, wenn das Loch den Punkt erreicht hat, wo die äußersten Strahlen die Achse schneiden. Da hierbei neben den zentralsten auch die peripherstен Lichtstrahlen durch das Loch dringen, so sieht man außer dem hellen Lichtfleck in der Mitte der Öffnung noch einen hellen Ring am Rande derselben. Da nächstliegende Strahlen sich auf der kaustischen Fläche schneiden, so ist es aus der Fig. 3 ersichtlich, daß bei positiver Aberration die peripheren, in das Loch dringenden Strahlen sich geschnitten haben, die zentralen nicht, und daß bei negativer Aberration das umgekehrte Verhalten stattfindet. Wenn kleine Bewegungen in seitlicher Richtung mit dem Loch ausgeführt werden, so bewegt sich demnach der zentrale Lichtfleck in der Öffnung immer in entgegengesetzter Richtung gegen den hellen Rand. Das Vorzeichen der Aberration wird daher nur durch die Bewegung des zentralen Fleckes bestimmt, und es gilt die Regel, daß auf den Querschnitten des Strahlenbündels, wo der helle Ring gesehen wird, der zentrale Fleck bei positiver Aberration sich in derselben Richtung wie das Loch bewegt, bei negativer in der entgegengesetzten. In den Fällen, wo die kaustische Fläche große Dimensionen hat, stellt die Pupille des Auges ein hinreichend kleines Loch dar, um mit diesem Versuche das Vorzeichen der Aberration zu bestimmen. Ein geeignetes Strahlenbündel erhält man am einfachsten mit einer gewöhnlichen bikonvexen Linse von 14 bis 16 dptr, wie sie zum umgekehrten ophthalmoskopischen Bild angewendet werden, indem ein mit einer feinen Nadel gemachtes Loch in einem dünnen, gegen den Himmel oder vor einer Flamme gehaltenen Karton als Lichtquelle dient. Wenn anfangs das Loch im Brennpunkte der Linse liegt, so konstatiert man zunächst, daß das Bild desselben, wenn man es in einer Entfernung von 60 bis 80 cm beobachtet und dabei seitliche Bewegungen mit dem Kopfe ausführt, sich in derselben Richtung zu bewegen scheint. Vergrößert man nun den Abstand der Linse vom Loche allmählich, indem man darauf achtet daß sowohl das Loch als die Pupille des angewendeten Auges auf der Achse der Linse liegen, so sieht man bald den hellen Ring, und man kann konstatieren, daß bei seitlichen Bewegungen des Kopfes der zentrale helle Fleck

sich unverändert verhält, d. h. daß die Aberration positiv ist. Wer im Ophthalmoskopieren geübt ist, kann den Versuch in kürzester Zeit machen, das Kartonblatt in der einen, die Linse in der anderen Hand haltend.

Auch die optische Projektion im Strahlenbündel gibt ein Mittel ab, welches in diesen einfacheren Fällen das Vorzeichen der Aberration ergeben kann. Wenn die kaustische Fläche zwischen der Objektebene und der Schirmebene liegt, so hat der Projektionskoeffizient und der Distorsionswert desselben bei positiver Aberration gleiche Vorzeichen, bei negativer entgegengesetzte. Im ersteren Falle kehrt die Projektion einer auf der achsensenkrechten Objektebene liegenden, die Achse nicht schneidenden Linie die konvexe, im letzteren Falle die konkave Seite der Achse zu. Ersterer Fall wird in der Literatur der physikalischen Optik als kissenförmige, letzterer als tonnenförmige Distorsion bezeichnet. Erstere zeigt somit bei der angegebenen Versuchsanordnung positive, letztere negative Aberration an, während das umgekehrte Verhalten stattfindet, sobald Objekt und Schirmebene auf einer und derselben Seite der kaustischen Fläche gelegen sind. Wenn man diesen Versuch mit dem in einer bikonvexen Linse gebrochenen Strahlenbündel machen will, muß man sich aber daran erinnern, daß zwischen Objekt und Bild keine brechende Fläche vorhanden sein darf, wenn aus dem Distorsionswerte ein Schluß auf das Vorzeichen der Aberration gezogen werden soll. Das Phänomen wird leicht konstatiert, wenn eine parallel zur Öffnung der Linse gehaltene Nadel dicht an derselben vorübergeführt wird, gestattet aber, wie gesagt, nur dann einen Schluß auf das Vorzeichen der Aberration, wenn die Nadel sich zwischen Linse und Schirmebene befindet.

Auch auf andere Weise kann die optische Projektion ausgenützt werden. Der allgemeine Wert des Projektionskoeffizienten

$$C = K\,(1 - \delta' B),$$

in welchem für die optische Projektion innerhalb eines Strahlenbündels K=1 zu setzen ist und B die im zentralen Objektpunkte gemessene reduzierte Konvergenz desselben, δ' den reduzierten Abstand des Schirmes vom Objekt darstellen, wechselt ersichtlicherweise beim Verschieben des Schirmes das Vorzeichen in dem Augenblick, wo der betreffende Fokalpunkt auf die Schirmebene fällt. Die Abbildung durch die optische Projektion ist deshalb ungleichsinnig oder gleichsinnig, je nachdem der betreffende Fokalpunkt zwischen Objekt und Schirm belegen ist oder nicht, während eine im betreffenden Hauptschnitt verlaufende kurze Linie im Fokalpunkte als Punkt erscheint. Ein zweckmäßiges Objekt bildet eine in einer Meridianebene liegende Reihe von Löchern in einem die Öffnung des Strahlenbündels ausfüllenden Schirme. Indem man zwei beliebige, einander nächstliegende Löcher frei läßt, die übrigen aber zudeckt, kann man die Schirmlage ermitteln, welche dem betreffenden Fokalpunkte entspricht, und so die τ-Linie punktweise konstruieren. Dasselbe erreicht man mit einem in der Meridianebene verschiebbaren Loche: überall, wo die Projektion eine gleichsinnige Bewegung macht, ist der Projektionskoeffizient positiv und umgekehrt. Am allercharakteristischsten ist bei diesem Versuche die Erscheinung der Projektion auf dem mit dem Schirme leicht zu ermittelnden dünnsten Strahlenbündelquerschnitte: der Lichtfleck wandert hier, wenn das Loch quer durch

die Öffnung geführt wird, dreimal hin und her über den ganzen Querschnitt, und zwar ist die Anfangs- und Schlußbewegung bei positiver Aberration ungleichsinnig, bei negativer gleichsinnig.

Da die spezifische Helligkeit der zur Verfügung stehenden Lichtquellen eine untere Grenze für die Größe des zur Erzeugung der Strahlenbündel angewendeten leuchtenden Punktes setzt und wegen der Diffraktion die Durchmesser der angewendeten Löcher oder schattenwerfenden Körper nicht zu klein gemacht werden können, so erfordert die Untersuchung der Aberration mittels der optischen Projektion einen relativ großen Durchmesser des Strahlenbündels und eignet sich dieselbe praktisch nur für die einfachsten Fälle.

Ein approximatives Maß des Aberrationswertes in einem Strahlenbündel erhält man durch Messung des Durchmessers des Zerstreuungskreises in der Fokalebene oder des größten Querschnittes der kaustischen Fläche oder des Abstandes dieses Querschnittes von der Fokalebene. Diese Größen ergeben sämtlich durch die oben angeführten Serien den Aberrationswert, indem als Resultat der Messung der numerische Wert von 2ξ bzw. 4ξ bzw. $s-s_0$ erhalten wird. Es ist aber ersichtlich, daß der so gefundene Aberrationswert nur bei relativ geringer Strahlneigung anwendbar ist, und daß derselbe zu hoch oder zu niedrig ausfällt, je nachdem die Koeffizienten der Glieder höherer Ordnung in den Serien dasselbe Vorzeichen haben wie der Aberrationswert oder das entgegengesetzte. Die Abhängigkeit der lateralen Abweichung von dem Aberrationswerte hat dazu geführt, daß man die sogenannte Aberration eines Strahles mit einer Eigenschaft des Strahlenbündels verwechselt hat, indem die Glieder höherer Ordnung einfach vernachlässigt wurden.

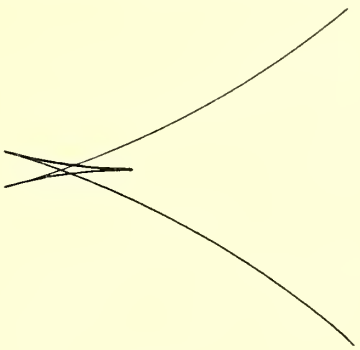


Fig. 5.

Während diese Verwechselung in dem eben untersuchten einfachen Falle relativ unschädlich ist, so führt sie bei komplizierterem Baue des Strahlenbündels — wie z. B. im Auge — zu grundfalschen Vorstellungen. Bei der sogenannten korrigierten sphärischen Aberration ist die Strahlenvereinigung nicht von homozentrischer Natur — gewisse Spezialfälle ausgenommen —, sondern die kaustische Fläche hat eine Kante, welche sich auf einem Meridianschnitt als zwei Spitzen kundgibt, wie die Fig. 5 zeigt. Wenn die Lichtbewegung von links nach rechts in der Figur erfolgt, so ist, wie ersichtlich, der Aberrationswert positiv. Der zwischen der Spitze und der Kante belegene Teil der kaustischen Fläche verhält sich im großen und ganzen wie bei der einfachen positiven Aberration. Zieht man in der Figur einen Strahl, welcher den entsprechenden zwischen zwei Spitzen gelegenen Teil der Schnittlinie der kaustischen Fläche berührt, so haben die Asymmetrienwerte auf demselben positives Vorzeichen. Der direkte Asymmetrienwert nimmt aber bei zunehmender Neigung des Strahles ab, um in dem Augenblick, wo der Strahl die nach dem Lichte zugekehrte Spitze der Schnittlinie berührt.

gleich Null zu werden. Wird dieser Strahl rückwärts bis in die Blendenöffnung verfolgt und durch den Schnittpunkt desselben mit der Blendenebene ein Kreis mit dem Blendenzentrum als Mittelpunkt gelegt, so entsteht eine Linie $R = O$ bzw. $U = O$, dadurch charakterisiert, daß längs sämtlichen Strahlen, welche dieselbe schneiden, der direkte Asymmetrienwert des Strahlenbündels bzw. die direkte Krümmungsasymmetrie der Wellenfläche desselben gleich Null ist. Beim Durchgang durch die Spitze wechselt der Krümmungsradius der Meridianschnittlinie der kaustischen Fläche, wie aus der Figur ersichtlich ist, das Vorzeichen, und der direkte Asymmetrienwert ist demnach bei zunehmender Neigung des Strahles negativ. Der transversale Asymmetrienwert bleibt aber nur positiv, bis die Neigung des Strahles eine solche geworden ist, daß er die kaustische Fläche in ihrem Schnittpunkte mit der Achse berührt, wo er den Wert Null erreicht, um dann bei noch mehr zunehmender Strahlneigung negativ zu sein. Durch Verfolgung der in diesem Schnittpunkte die kaustische Fläche berührenden Strahlen rückwärts bis in die Blendenöffnung erhält man hier auf oben angegebene Weise die Linie $S = O$ bzw. $W = O$, welche von größter Bedeutung für die Strahlenvereinigung ist. Da nämlich das Strahlenbündel längs jedem durch diese Linie gehenden Strahle anastigmatisch ist und die Fokalpunkte auf diesen sämtlichen Strahlen zusammenfallen, so besteht in dem Schnittpunkte der kaustischen Fläche mit der Achse eine vollständige Strahlenvereinigung erster Ordnung längs einer unendlich großen Anzahl durch denselben gehender Strahlen. Durch diese außerordentliche Güte der Strahlenvereinigung wird der betreffende Schnittpunkt für die optische Abbildung maßgebend. Wie aus der Figur ersichtlich, liegt derselbe auf der negativen Seite des axialen Fokalpunktes, so daß die durch die Linie $S = O$ gehenden Strahlen immer noch eine negative laterale Abweichung haben. Bei zunehmender Neigung des Strahles wird aber schließlich erreicht, daß derselbe durch den axialen Fokalpunkt geht, um bei noch größerer Neigung eine positive laterale Abweichung zu haben. Es dürfte hierdurch ersichtlich sein, daß die laterale Abweichung des äußersten Strahles nichts von der Strahlenvereinigung aussagt, sondern daß dieselbe wesentlich vom Aberrationswerte auf der Achse und von den Linien $R = O$ und $S = O$ abhängig ist. Da man nun in der physiologischen Optik die Aberration durch erstere Abweichung hat messen wollen, war es nötig, dieselbe durch den Begriff der *peripheren Totalaberration* von den die Aberration wirklich charakterisierenden Größen zu unterscheiden. In dem in der Fig. 5 dargestellten Falle ist das Vorzeichen der peripheren Totalaberration nur von der Blendengröße abhängig, während die Strahlenvereinigung bei abnehmender Blendengröße nicht wesentlich berührt wird, bevor die Blende bis auf den Durchmesser der Linie $S = 0$ eingeengt worden ist, wobei die periphere Totalaberration dasselbe Vorzeichen der lateralen Abweichung aufweist wie in den unkomplizierten Fällen bei positiver Aberration, mithin positiv genannt wird. Bei einer solchen Blendengröße, daß die periphere Totalaberration gleich Null ist, wird der in der Fig. 5 dargestellte Fall in der Literatur der konstruktiven Optik als korrigierte sphärische Aberration mit positiven Zonen bezeichnet. Würde der Strahlengang umgekehrt werden, so wären die „Zonen“ negativ. Je nach der Größe der Blendenöffnung müßte von korri-

gierter, unterkorrigierter oder überkorrigierter „sphärischer“ Aberration die Rede sein.

Diese Konstitution kann in einem gegebenen Strahlenbündel an den Schnittlinien der kaustischen Fläche mit einer Schirmebene leicht konstatiert werden. Da nämlich, wie aus der Fig. 5 hervorgeht, sämtliche Strahlen, welche peripheriewärts von der Linie $R=0$ die Blendenöffnung passieren, auch die Ebene, welche die Kante der kaustisehen Fläehe enthält, peripheriewärts von derselben schneiden, so folgt hieraus, daß bei der Verschiebung der Schirmebene in der Richtung der Lichtbewegung die zuerst sichtbare Schnittlinie der kaustischen Fläche nicht die Begrenzungslinie des Strahlenbündelquerschnittes ausmacht. Hierdurch ist die Gegenwart der Linie $R=0$ in der Blendenöffnung konstatiert, und die fragliche Schnittlinie der kaustischen Fläche stellt eben die entspreehende Kante dar. Da auf derselben eine partielle Strahlenvereinigung zweiter Ordnung stattfindet, ist sie sehr leicht zu sehen. Je nach der Blendenöffnung erhält der zuletzt sichtbare Schnitt der kaustischen Fläche die Spitze oder die Schnittlinie des umgebogenen Teiles derselben oder aueh beides. Bei partieller Zudeckung der Blendenöffnung versehwinden die entgegengesetzten Teile einer solchen Schnittlinie zuerst. Da dieses Verhalten nur möglich ist, wenn die in der betreffenden Linie die kaustische Fläche berührenden Strahlen eine größere Neigung als die durch die Linie $S=0$ gehenden haben, so ist die Gegenwart dieser Linie in der Blendenöffnung konstatiert, sobald auf einem Querschnitte der kaustischen Fläche bei partieller Zudeckung der Blende eine Schnittlinie dieser Fläche von der entgegengesetzten Seite her verschwindet.

Die Durehmesser der Linien $R=0$ und $S=0$ erhält man bei sukzessiver Einengung der Blende, indem dieselben den bezüglichen kleinsten Blendendurchmessern entsprechen, bei welchen das Vorhandensein der betreffenden Linie in der Blendenöffnung noch konstatiert werden kann. Den Aberrationswert auf der Achse erhält man durch Messung des Durchmessers der Kante der kaustischen Fläche oder des Abstandes derselben von der Fokalebene auf oben angegebene Weise. Die Gegenwart einer Linie $R=0$ beweist aber das Vorhandensein von Gliedern höherer Ordnung in den betreffenden Serien, welche entgegengesetztes Vorzeichen gegen den Aberrationswert haben, so daß das approximative durch die Messung erhaltene Resultat numerisch immer zu klein ist.

Das symmetrische Strahlenbündel wird nach hauptsächlich denselben Prinzipien untersucht wie das achsensymmetrische, nur sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Wenn der Astigmatismus längs der Achse gleich Null ist, so hat jedoch die zweite kaustische Fläche eine mehr oder weniger verwickelte Form, welche im Aussehen der auf einer Schirmebene aufgefangenen Querschnitte zutage tritt. In den für die physiologische Optik in Frage kommenden Strahlenbündeln findet sich aber in jedem Hauptschnitte eine Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche bei einer Schirmlage vor, wo die zweite noch nicht geschnitten wird, so daß das Vorhandensein einer Linie $R=0$ auf diesclbe Weise konstatiert, die Aberration gemessen werden kann, wenn jeder Hauptschnitt für sich untersucht wird. Bei positiven Aberrationswerten und ausgeprägtem Astigmatismus der Aberration hat die kaustisehe Fläche auf der in der Richtung der Lichtbewegung fortgeschobenen Schirm-

ebene zunächst zwei kurze Schnittlinien, welche denjenigen Hauptschnitt senkrecht schneiden, in welchem die direkte Aberration den größeren Wert hat, um erst dann eine geschlossene Schnittlinie zu zeigen, wenn die Schirmebene die im anderen Hauptschnitte verlaufende τ-Linie schneidet. Liegt kein Astigmatismus der Aberration, wohl aber ein ausgeprägter Diagonalastigmatismus derselben vor, so hat das Strahlenbündel vier Symmetrieebenen, und der zuerst sichtbare Schnitt der kaustischen Fläche besteht aus vier kurzen Linien, welche zwei aufeinander senkrecht stehende Symmetrieebenen schneiden. Etwas weiter ab zeigt sich die Schnittlinie der zweiten kaustischen Fläche, und man erkennt deutlich die nach dem Schema der

Fig. 6.

Fig. 4 angeordneten Spitzen. Die Figur stellt zwei Fälle dar, wo der Astigmatismus der Aberration nicht gleich Null ist. Wenn aber dies der Fall ist, so bilden die Ebenen, in welchen die Spitzen liegen, Winkel von 45^0 miteinander. Die am weitesten herausragenden Spitzen liegen in den Ebenen, wo die direkte Aberration den größten Wert hat, und verursachen auf einem der Spitze der kaustischen Fläche etwas näher belegenen Schnitte vier scharfe strahlenförmige Ausbuchtungen, wie die Fig. 6 zeigt. Dieselbe stellt die Photographie eines stark verkleinerten Sonnenbildes dar, unter Anwendung eines Objektives mit großer diagonalastigmatischer Aberration. Um hinreichend große Dimensionen der kaustischen Fläche zu erhalten, empfiehlt es sich, bei der experimentellen Erzeugung von Strahlenbündeln eine Telekombination zu verwenden, und diese Photographie wurde auch mit einer solchen erhalten, welche aus einer bizylindrischen Lupe und einem

kräftigen Okulare zusammengesetzt war. Um den größtmöglichen Wert der diagonalastigmatischen Aberration zu erhalten, wurden vier plankonvexe Zylinderlinsen von 6 dptr derart kombiniert, daß sämtliche die Planfläche dem Lichte zukehrten, während die Achsen der vordersten und hintersten Linse in einer Ebene, die Achsen der beiden übrigen in der auf dieser Ebene senkrecht stehenden orientiert waren. Da die Linsen tatsächlich nicht unendlich dünn sind, so entsteht auf diese Weise ein geringer Astigmatismus auf der Achse, welche durch eine passend angebrachte schwache Zylinderlinse vernichtet wird. Daß aus derselben Ursache ein geringer Astigmatismus der Aberration entsteht, ist in der Figur aus der verschiedenen Länge der strahlenförmigen Ausbuchtungen ersichtlich. Die zwischen denselben sichtbaren hellen Linien sind Schnittlinien der kaustischen Fläche. Wie durch partielle Zudeckung der Öffnung konstatiert werden kann, entstehen dieselben durch Lichtstrahlen, welche die Achse nicht geschnitten haben, während bei den strahlenförmigen Ausbuchtungen das entgegengesetzte Verhalten stattfindet. Diese sind in Übereinstimmung hiermit außen blau, jene außen rot gefärbt, wenn die Telekombination als Fernrohr gegen eine kleine Lichtquelle gerichtet wird.

Wenn weder der Astigmatismus noch der Diagonalastigmatismus der Aberration endliche Werte haben, so können Symmetrieebenen in größerer Anzahl vorhanden sein, und die mathemathische Analyse lehrt, daß dabei die Erscheinungen qualitativ dieselben sind. Bei acht Symmetrieebenen entstehen somit ebenso viele strahlenförmige Ausbuchtungen und tritt eine abgerundet achteckige Schnittfigur der kaustischen Fläche an Stelle der in der Fig. 6 sichtbaren viereckigen usw. Wenn es im diagonalastigmatischen Objektive nicht gelingt, den Achsen genau die vorgeschriebene Stellung zu geben, so resultieren Asymmetrienwerte höherer Ordnung, welche, ohne den Hauptcharakter der Erscheinungen zu verändern, dieselben komplizierter machen. Auf dieselbe Weise kann, wenn acht oder mehr strahlenförmige Ausbuchtungen vorliegen, durch Asymmetrienwerte höherer Ordnung die regelmäßige Anordnung derselben verloren gehen. Daß die Querschnitte der kaustischen Fläche beim Vorhandensein einer Linie $R=0$ in diesen Fällen noch verwickeltere Figuren darbieten können, ist ersichtlich. Obwohl nun die Strahlenvereinigung im Auge diese Form — die komplizierteste unter allen bekannten — aufweist, so ist dieselbe dennoch, seitdem die mathematische Analyse die Trennung des Wesentlichen vom Unwesentlichen ermöglicht hat, der Untersuchung leicht zugänglich, indem letztgenannte Linie auf gewöhnliche Weise gefunden und die übrigen diese Form der Strahlenvereinigungen charakterisierenden Erscheinungen ohne Schwierigkeit konstatiert werden können.

Ist das symmetrische Strahlenbündel längs der Achse astigmatisch, so liegen die einfachsten Verhältnisse vor, wenn nirgends Schnittlinien beider kaustischen Flächen in einer und derselben Ebene liegen. Da die τ-Linien auf beiden kaustischen Flächen dasselbe Verhalten zeigen wie im achsensymmetrischen Strahlenbündel, so lassen sich die direkten Aberrationswerte auf dieselbe Weise ermitteln, und auch die transversalen ergeben sich aus ähnlichen einfachen Untersuchungen, aber diese Fälle haben für die physiologische Optik keine Bedeutung, da im Auge wegen des Ver-

hältnisses der Blendenöffnung und der Aberration zur Brennstrecke unter einigermaßen physiologischen Verhältnissen immer Schnittlinien beider kaustischen Flächen auf einer und derselben Ebene liegen. Wenn keine Linie R=0 vorhanden ist, zeigen die Schnittlinien der kaustischen Flächen mit einem der Hauptschnitte den in der Fig. 7 dargestellten Typus. Die τ-Linie, welche im ersten Fokalpunkt eine Spitze hat, ist die Schnittlinie der einen,

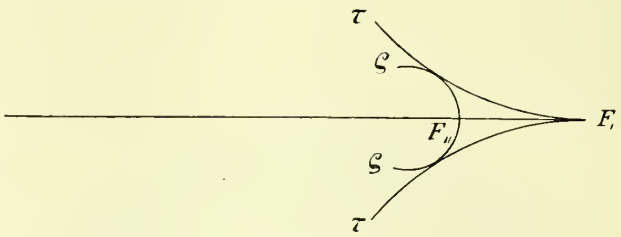


Fig. 7.

die ς-Linie, welche dieselbe in zwei Punkten berührt, fällt mit der Kante der anderen kaustischen Fläche zusammen, und längs den beiden, die kaustischen Flächen in den gemeinsamen Berührungspunkten tangierenden Strahlen ist das Strahlenbündel anastigmatisch. Auf dem zweiten Hauptschnitt finden sich Berührungspunkte zwischen den beiden Schnittlinien der kaustischen Flächen nicht vor. Die betreffende τ-Linie hat eine Spitze im zweiten Fokalpunkte, die ς-Linie geht mit endlicher Krümmung durch den ersten. Die Querschnitte eines solchen Strahlenbündels zeigen die in der Fig. 8 reproduzierten photographischen Aufnahmen, welche ich Herrn A. Odencrants verdanke. Das astigmatische Glied der Telekombination bestand aus einer sphärozylindrischen Kombination von 10 dptr sphärischer und 1 dptr zylindrischer Wirkung mit dem Lichte zugekehrter Zylinderfläche. Die Einstellung der verschiedenen Querschnitte erfolgte aber durch Veränderung des Abstandes der beiden Komponenten der Telekombination, so daß die gegenseitigen Größenverhältnisse derselben nicht richtig wiedergegeben worden sind. Denkt man sich in der Richtung der Lichtbewegung auf der Achse in der Fig. 7 blickend, während dieselbe um die Achse so gedreht wird, daß ihre Ebene senkrecht auf der Papierebene steht, so sieht man, wenn der Schirm in der Richtung der Lichtbewegung fortgeschoben wird, die Querschnittreihe der Fig. 8 von unten nach oben Revue passieren. Am ersten Querschnitte (am untersten Bild) ist nur die zweite kaustische Fläche vorhanden. Es gehören nämlich die peripheriewärts von den anastigmatischen Fokalpunkten belegenen Teile der τ-Linie der zweiten kaustischen Fläche an und umgekehrt, indem sich die beiden Flächen schneiden. Die nach oben und unten liegenden Endpunkte der Figur entsprechen also den in der Fig. 7 mit τ bezeichneten Punkten. Das nächste Bild zeigt Schnittlinien beider kaustischer Flächen. Die horizontal anslaufenden Spitzen sind Schnitte der durch den ersten Fokalpunkt gehenden, auf der ersten kaustischen Fläche liegenden Kante. Unmittelbar zentralwärts vom oberen und unteren Endpunkte liegen zwei Spitzen, welche den mit ς in der Fig. 7 be-

zeiehneten Punkten entspreehen. Das dritte Bild zeigt den Querschnitt durch die beiden anastigmatisehen Fokalpunkte, welche oben und unten durch das S. 21 erwähnte pfeilspitzenähnliche Aussehen leicht kenntlieh sind. Der vierte Schnitt geht durch den zweiten Fokalpunkt und zeigt die vertikale zweite Fokallinie. Hier ergibt sieh am deutlichsten, welehe tatsächliehe Bedeutung das Konoid von Sturm hat. Wollte man dasselbe zugrunde legen, so müßte dieser Quersehnitt des Strahlenbündels mit der schmalen vertikalen Linie identiseh sein. Der näehstletzte Sehnitt fällt in die Brennstreeke, und endlieh zeigt der letzte (das oberste Bild) die erste Fokallinie, indem derselbe die durch den ersten Fokalpunkt gehende Kante berührt.

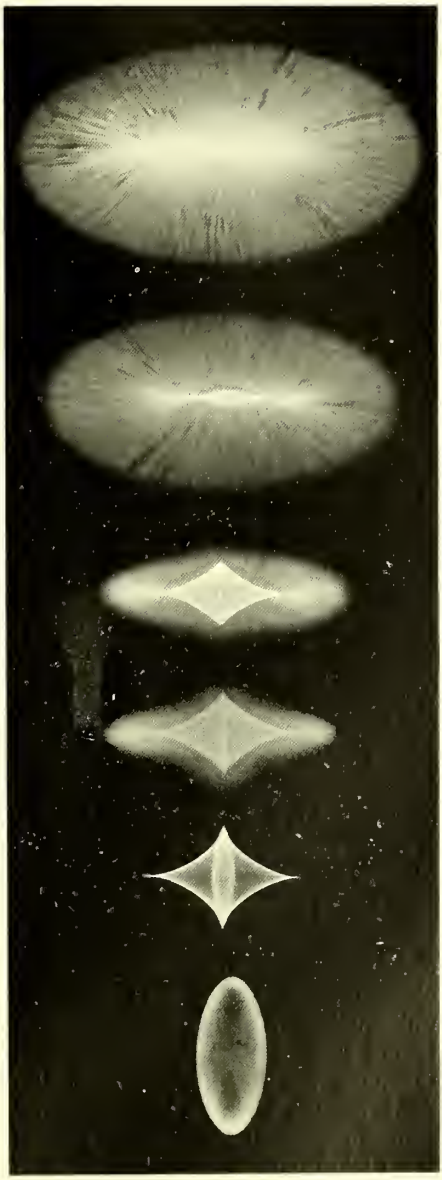


Fig. 8.

Der künstliche Astigmatismus bietet ein vortreffliches Mittel dar, um die Aberration eines aehsensymmetrisehen Strahlenbündels zu messen. Maeht man nämlieh dasselbe dureh Vorsehalten von Zylinderlinsen immer mehr astigmatisch, so erhält man dureh das stärkste Zylinderglas, mit welehem noeh Schnittlinien der beiden kaustischen Flächen auf einem und demselben Quersehnitte erhalten werden können, ein Maß des Abstandes des Fokalpunktes vom größten Quersehnitte der kaustischen Fläehe, bzw. wenn eine Linie R=O vorhanden ist, von der entspreehenden Kante, ein Maß, welehes von einer Variation der optischen Einstellung — im Auge also von der Akkommodation — praktiseh unabhängig ist. Auch bei der dureh strahlenförmige Ausbuchtungen charakterisierten Form der Strahlenvereinigung läßt sich diese Untersuchung anwenden, obwohl die kaustischen Flächen eine verwiekeltere Form haben. Man kann sich leicht hiervon überzeugen, wenn man das in der Fig. 6 dargestellte Strahlenbündel astigmatisch maeht.

Aus dem Obenstehenden geht hervor, daß bei der optisehen Abbildung mit weitgeöffneten Strahlenbündeln versehiedene Quersehnitte derselben je

nach der Forderung an Detailschärfe, Schleierfreiheit und Kontrast die besten Resultate geben werden. In den Fällen, wo auf einem Strahlenbündelquerschnitte zwei oder mehr kurze Schnittlinien der kaustischen Fläche sichtbar sind, entsteht bei entsprechender Schirmlage eine doppelte bzw. mehrfache Abbildung.

5. Die Helligkeit und Begrenzung der optischen Bilder.

Die strahlende Energie stellt, wenn die Wellenlänge zwischen gewissen Grenzen liegt, einen adäquaten Reiz der Netzhaut dar und wird dann Licht genannt. Da aber die Wirkung auf die Netzhaut bei verschiedener Wellenlänge nicht der auffallenden Energiemenge proportional ist, so kommt jeder Wellenlänge ein verschiedener Lichtwert zu. Derselbe wird in der Literatur auch als physiologischer Proportionalitätsfaktor bezeichnet. Die Lichtmenge einer monochromatischen Strahlung wird somit durch das Produkt der Energiemenge mit dem betreffenden Lichtwerte gemessen, ergibt sich aber bei zusammengesetztem Lichte aus der über das ganze Wellenlängengebiet ausgeführten Summation der den verschiedenen Wellenlängen entsprechenden Produkte. Die Lichtstärke eines leuchtenden Gegenstandes ist gleich der im Raumwinkel eins in der Zeiteinheit ausgestrahlten Lichtmenge. Die spezifische Lichtstärke, auch die spezifische Helligkeit oder die Leuchtkraft oder der Glanz genannt, ist gleich der Lichtstärke der Flächeneinheit des leuchtenden Körpers in der senkrechten Richtung. Die Lichtmenge, welche in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit eines Gegenstandes fällt, ist die Beleuchtungsstärke auf demselben. Da aber diese Lichtmenge von dem Vorhandensein des Gegenstandes unabhängig ist und die entsprechende Beleuchtungsstärke nur von der Neigung der Oberfläche abhängt, so wird auch der Begriff der Lichtdichte angewandt. Dieselbe ist in einem beliebigen vom Licht durchströmten Punkte gleich der Beleuchtungsstärke auf einer durch denselben senkrecht zu den Lichtstrahlen gelegten Fläche. Endlich wird die Gesamtheit der von einem leuchtenden Körper ausgegangenen, auf eine Fläche fallenden oder durch eine Öffnung hindurchgehenden Lichtstrahlen eine Lichtröhre genannt.

Die Verfolgung einer Lichtröhre durch ein optisches System ist ersichtlicherweise gleichbedeutend mit der Anwendung der Abbildungsgesetze auf Lichtquelle und Blendenöffnung, und es empfiehlt sich deshalb um so eher, die Helligkeit und Begrenzung der optischen Bilder zusammen zu untersuchen, als sich in der physiologischen Methodik die betreffenden Probleme zusammen aufstellen. Es wird aber hier genügen, die Gesetze erster Ordnung auf der Achse eines Umdrehungssystems vorzulegen. Hierzu ist dann ausdrücklich zu bemerken, daß die Resultate nur Limeswerte darstellen, welchen sich die reellen Werte unendlich nähern, wenn die Dimensionen der Lichtquelle und der Blendenöffnung unendlich gegen Null hin abnehmen.

Ist e die spezifische Intensität einer Lichtquelle, o die Flächenausdehnung derselben und p die Größe einer im endlichen Abstande a von der Lichtquelle belegenen Fläche, so ist bei unendlich kleinen Werten von o und p, wenn beide Flächenelemente senkrecht auf den Lichtstrahlen stehen, e o die Lichtstärke und

$$L = \frac{e\,o\,p}{a^2}$$

die gesamte Lichtmenge, welche in der Zeiteinheit einen beliebigen Querschnitt der Lichtröhre passiert. Es ist hierbei gleichgültig, ob die Lichtquelle aus einem selbstleuchtenden oder diffus lichtreflektierenden Körper besteht. Für die Lichtdichte E auf der Fläche p ergibt sich somit

$$E = \frac{e\,o}{a^2}$$

woraus hervorgeht, daß die Lichtdichte allgemein gleich dem Produkte der spezifischen Lichtstärke der Lichtquelle mit der Raumwinkelgröße derselben ist. (Die Raumwinkelgröße eines Flächenelementes in einem auf der Normale gelegenen Punkte ist gleich der mit dem Quadrate des Abstandes dividierten Flächengröße.)

Bei der optischen Abbildung der Lichtquelle in einem achsensymmetrischen System mag $p\,p'$ den Flächeninhalt der Ein- bzw. Austrittspupille, o' den des Bildes der Lichtquelle und b den Abstand desselben von der Austrittspupille darstellen. Es sei ferner e' die spezifische Lichtstärke des Bildes und $n\,n'$ der Brechungsindex im ersten und letzten Medium. Die in der Zeiteinheit einen Querschnitt der Lichtröhre im letzten Medium passierende Lichtmenge L' ist dann

$$L' = \frac{e'\,o'\,p'}{b^2}$$

Da nun, wenn von der Lichtabsorption der Medien und von den Reflexionsverlusten abgesehen wird, $L' = L$ sein muß, so hat man nur in der allgemeinen Abbildungsgleichung $\varkappa\,K\,B = A$

$$\varkappa^2 = \frac{p'}{p} \qquad K^2 = \frac{o'}{o} \qquad A = -\frac{n}{a} \qquad B = \frac{n'}{b}$$

zu setzen, um

$$\frac{e'}{n'^2} = \frac{c}{n^2}$$

zu erhalten. Die spezifische Lichtstärke des Bildes ist somit nur von den Brechungsindizes abhängig und überall im System dem Quadrate des Brechungsindex proportional.

Wie aus der Definition der Lichtdichte hervorgeht, ist dieselbe im optischen Bilde

$$\frac{e'\,p'}{b^2}$$

Bei der Anwendung dieses Ausdruckes hat man aber zu beachten, daß allgemein verschiedenen Objektabständen verschiedene Austrittspupillen entsprechen, da in optischen Systemen u. a. jede Linsenfassung eine Blende darstellt. Die Austrittspupille ergibt sich durch Abbildung sämtlicher Blenden und Fassungen im Bildraum. Diejenige dieser abgebildeten Öffnungen, welche im Bildpunkte die kleinste Raumwinkelgröße hat, stellt die Austritts-

pupille dar. In der Fig. 9 sei AB das Bild einer Blendenöffnung, CD das einer Linsenöffnung, und es sei der einfachste Fall angenommen, daß zwischen diesen kein anderes Öffnungsbild liegt, und daß die Strahlen AD und BC durch sämtliche anderen abgebildeten Öffnungen gehen. Diese Strahlen schneiden einander im Achsenpunkte E, die Strahlen AC und BD schneiden die Achse im Punkte F, während die zum zentralen Objektpunkte I gehenden Strahlen das Linsenbild CD in den Punkten G und H schneiden. Es ist sofort ersichtlich, daß für das in I belegene Bild AB die Austrittspupille darstellt, solange I zwischen E und F liegt, daß aber für jenseits E oder F belegene Bilder CD die Austrittspupille ist. Wenn es sich um eine Abbildung in durchfallendem Lichte handelt, und bei der Bestimmung der Lichtdichte an anderen Stellen als im Bilde der Lichtquelle, kann unter Umständen dieses Bild die Austrittspupille darstellen. Wenn z. B. ceteris paribus in der Fig. 9 CD nicht das Bild einer Linse, sondern das der Lichtquelle vorstellt,

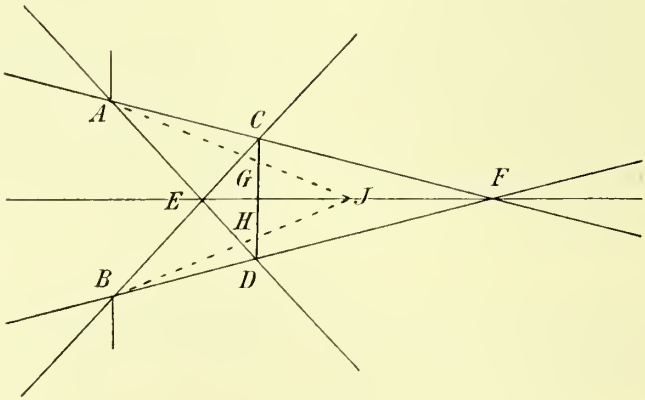


Fig. 9.

so stellt dieses Bild für die jenseits E oder F gelegenen Achsenpunkte die Austrittspupille dar. Es mag der Flächeninhalt von AB mit q' bezeichnet werden. Wenn keine Blende vorhanden wäre, so würde die Lichtdichte in einem Achsenpunkte, dessen Abstand von AB bzw. CD mit c bzw. d bezeichnet werden mag, analog wie im Objektraume durch den Ausdruck

$$E' = \frac{e' o'}{d^2}$$

erhalten werden. Wenn aber in der Fig. 9 I einen solchen Punkt darstellt, so ist es einleuchtend, daß von den jenseits der Punkte G und H gelegenen Punkten des Lichtquellenbildes kein Licht zu I gelangen kann, daß somit anstatt o' der durch den Durchmesser GH repräsentierte Flächeninhalt des Bildes der Lichtquelle in den Ausdruck für die Lichtdichte einzusetzen ist. Da nun aber $GH : d = AB : c$ ist, so ist die Lichtdichte im Punkte I, so lange I zwischen E und F gelegen ist, d. h. wenn AB die Austrittspupille darstellt,

$$E' = \frac{e' q'}{c^2}$$

während, wenn CD die Austrittspupille ist, der obenstehende Ausdruck gültig bleibt. Auf ähnliche Weise werden die Fälle behandelt, wo die Lichtquelle nicht kreisförmig begrenzt und auf der Achse des optischen Systems zentriert ist. Bezeichnet man als nützliche Austrittspupille in bezug auf einen gegebenen Achsenpunkt im letzten Medium denjenigen Teil des von diesem Punkte aus unter kleinstem Winkel erscheinenden Öffnungsbildes, welcher mit demselben Punkte als Projektionszentrum in das Bild der Lichtquelle projiziert werden kann, und stellt allgemein p' den Flächeninhalt der nützlichen Austrittspupille, b den Abstand des betreffenden Achsenpunktes von derselben dar, so fallen die drei verschiedenen Ausdrücke für die Lichtdichte in einen zusammen und ergibt sich

$$E' = \frac{e' p'}{b^2}$$

so daß die Lichtdichte auf einem Achsenpunkte allgemein gleich der mit dem Quadrate des relativen Brechungsindex und mit der Raumwinkelgröße der nützlichen Austrittspupille multiplizierten spezifischen Lichtstärke des Objektes ist.

Bei der Beurteilung der Verhältnisse beim Sehen empfiehlt es sich, das durch Kombination des Auges mit einem beliebigen optischen Systeme entstandene Vollsystem als das bewaffnete Auge zu bezeichnen. Es folgt dann aus dem Obenstehenden teils, daß auf der Netzhaut die Raumwinkelgröße der Austrittspupille im bewaffneten Auge — gleiche anatomische Pupillengröße vorausgesetzt — nie diejenige im unbewaffneten Auge überschreiten kann, daß somit die Lichtdichte bei der Abbildung auf der Netzhaut durch Vorschalten von optischen Instrumenten nie erhöht, wohl aber vermindert werden kann, teils aber auch, daß beim Sehen in Zerstreuungskreisen die Lichtdichte auf der Netzhaut unabhängig von der Lage des Objektes und der optischen Einstellung des Auges ist und denselben Wert wie bei der Abbildung hat, solange das Objekt eine solche Größe besitzt, daß das Bild desselben nicht als Austrittspupille funktioniert.

Unter sämtlichen im Bildraume entstehenden Bildern der Blenden und Fassungen im optischen System wird auf oben angegebene Weise die Austrittspupille für einen beliebigen Achsenpunkt im letzten Medium gefunden. Die übrigen Öffnungsbilder seien nach M. v. Rohr als Austritts-, ihre im Objektraume konjugierten Bilder als Eintrittsluken bezeichnet. In dem in der Fig. 9 veranschaulichten Falle, wo nur zwei Öffnungen wirken können, ist somit das Öffnungsbild, welches nicht die Austrittspupille darstellt, die einzig vorhandene Austrittsluke. Die Wirkung dieser Luken auf die Ausdehnung des Bildfeldes bzw. die Lichtdichte auf demselben ist durch die Figur 9 ersichtlich. Wenn z. B. in I eine achsensenkrechte Schirmebene vorhanden ist, so schneidet der durch die Strahlen AF und BF bestimmte Kegel aus derselben den durch die volle Aperturblende erleuchteten Teil aus. An einen jenseits des Schnittpunktes der Schirmfläche mit einer der Linien AF oder BF belegenen Punkt gelangt nur ein durch die Luke abgeschnittener Teil des durch die Austrittspupille gehenden Strahlenbündels, es besteht eine mit zunehmender Strahlneigung zunehmende Vignettierung.

Wie ersichtlich markieren die Fortsetzungen der Linien AC und BD die Grenze zwischen voll erleuchtetem und vignettiertem Felde, die der Linien AD und BC die äußere Grenze des vignettierten Feldes, solange die Schirmebene nach links von AB oder nach rechts von CD gelegen ist, während, wenn dieselbe zwischen den beiden Öffnungsbildern liegt, die Rolle dieser Linien vertauscht wird. Steht die Schirmebene in E oder F, so zieht sich das voll erleuchtete Feld auf einen Punkt zusammen, und das ganze Feld ist vignettiert. Sind wiederum mehrere Austrittsluken vorhanden, so finden sich im vignettierten Teile des Feldes eine entsprechende Anzahl von Zonen vor, wo die Vignettierung auf verschiedene Weise zustandekommt. Soll die Vignettierung eines optischen Bildes vermieden werden, so hat man entweder das Objekt selbst oder ein reelles optisches Bild desselben im System durch eine Feldblende abzugrenzen, deren Bildgröße im letzten Medium die des voll erleuchteten Feldes nicht übersteigt.

Da wegen der geringen Ausdehnung der Stelle deutlichen Sehens auf der Netzhaut das Sehen immer unter Bewegung des Auges vor sich geht, so hat man im bewaffneten Auge zwischen der Ausdehnung des scharf gesehenen Feldes und der des auf einmal gesehenen einen Unterschied zu machen. Nur für letzteres Feld wird die Austrittspupille auf oben angegebene Weise gefunden, für ersteres ist der Ort des Augendrehungspunktes ausschlaggebend, indem das scharfe Sehen erfordert, daß der die Spitze der kaustischen Fläche im Auge berührende Lichtstrahl nicht ausgeschlossen ist, und die Annahme, daß derselbe durch den Drehpunkt des Auges geht — also mit der Blicklinie zusammenfällt — für diese Frage keine in Betracht kommenden Fehler verursacht.

Die Blende, deren im Objekt- und Bildraum konjugierte Bilder die Ein- und Austrittspupille darstellen — die Aperturblende — hat in jedem Medium ein konjugiertes Bild, die Pupille des betreffenden Mediums. Es kann nun dieselbe Untersuchung, welche im letzten Medium bezüglich der Austrittspupille und der Austrittsluken oben beschrieben worden ist, ebensowohl in einem beliebigen anderen Medium ausgeführt werden, indem das Verhältnis der in diesem Medium entstandenen reellen oder virtuellen Bilder der verschiedenen Öffnungen und des Objekts ausschlaggebend ist. Wird diese Untersuchung im bewaffneten Auge in das zwischen vorgeschaltetem Instrument und Auge befindliche Medium verlegt, so hat man demnach die Ausdehnung und Vignettierung des Blickfeldes neben der des Gesichtsfeldes durch die betreffenden Pupillen und Luken zu bestimmen. Für das Blickfeld schrumpft die Pupille auf den Augendrehpunkt zusammen, für das Gesichtsfeld bei zentraler Blickstellung ist dagegen dasjenige Öffnungsbild, welches in dem Punkte, für welchen das Auge eingestellt ist, den kleinsten Winkeldurchmesser hat, die Pupille. Bei emmetropischem akkommodationslosem Auge ist somit das kleinste Öffnungsbild die Gesichtsfeldpupille in diesem Medium. Dasjenige vom Instrumente entworfene Öffnungsbild, welches im Augendrehpunkt den kleinsten Winkeldurchmesser hat, ist die Blickfeldblende und markiert die äußere Grenze des scharf gesehenen Feldes. Die Vignettierung des Blickfeldes, welche durch partielles Abschneiden der bei exzentrischer Blickstellung in das Auge eindringenden, zur Fovea konvergierenden Strahlenbündel zustande kommt, kann sowohl

durch andere Luken des Instruments, wie namentlich durch die Pupille des Auges verursacht werden.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse, wenn nur ein vom Instrumente entworfenes Öffnungsbild hinreichend klein ist, um in Wirkung treten zu können, wie es sich z. B. im astronomischen Fernrohr ohne Schwierigkeit erreichen läßt, wo das Bild der Objektivöffnung die Austrittspupille darstellt und andere Öffnungen hinreichend groß gemacht werden können. Wird die Austrittspupille eines solchen Instrumentes so verlegt, daß ihr Rand auf der Sphäre liegt, auf welcher sich der Rand der Eintrittspupille des Auges bei den Bewegungen desselben verschiebt, so ist es einleuchtend, daß die Vignettierung des Blickfeldes eben anfängt, wenn bei der Bewegung des Auges der Rand der Eintrittspupille desselben mit dem Rande der die Blickfeldblende darstellenden Austrittspupille des Instrumentes zusammenfällt, und daß somit im Augendrehpunkt der Winkeldurchmesser des unvignettierten Blickfeldes gleich dem Unterschiede der Winkeldurchmesser des ganzen Blickfeldes und der Eintrittspupille des Auges ist. Wenn die Austrittspupille des Instrumentes die gleiche Größe wie die Eintrittspupille des Auges hat, ist demnach das ganze Blickfeld vignettiert, und bei zunehmender Größe der Austrittspupille des Instrumentes entsteht im Zentrum desselben ein unvignettierter Teil, während die vignettierte Zone mit unveränderter Winkelbreite der sich erweiternden Außengrenze des Blickfeldes anliegt. Wird aber die Austrittspupille des Instrumentes kleiner als die Eintrittspupille des Auges, so entsteht wiederum im Zentrum des sich dabei verkleinernden Blickfeldes ein unvignettierter Teil, welcher sich bei zunehmeder Verengerung der Blickfeldgrenze immer mehr vergrößert, bis das ganze Blickfeld unvignettiert ist, was dann eintrifft, wenn der Winkeldurchmesser der Austrittspupille des Instrumentes sich bis auf die halbe Größe desjenigen der Eintrittspupille des Auges verkleinert hat.

Wird wiederum die Austrittspupille eines vorgeschalteten Instrumentes an eine solche Stelle verlegt, daß sie nicht als Blickfeldblende wirkt, so kann es eintreffen, daß die Eintrittspupille des Auges eine Gesichtsfeldluke wird. Wenn man z. B. in einem astronomischen Fernrohr das Okular durch eine Konvexlinse von großer Öffnung ersetzt, welche die Objektivöffnung aplanatisch abbildet, und dafür Sorge trägt, daß der Lichtweg vom Rande der Objektivlinse zum gleichzeitigen Teil des Randes der Okularlinse frei ist, so kann man die Austrittspupille an den Ort des Augendrehpunktes verlegen und durch Einengung der Objektivöffnung kleiner als die Eintrittspupille des Auges machen, wobei sie die am Orte der Blickfeldpupille liegende Gesichtsfeldpupille darstellt. Das Blickfeld ist dann nur von der Fassung der Okularlinse begrenzt, die Eintrittspupille des Auges wirkt aber als bewegliche Gesichtsfeldluke, so daß man zwar das ganze Blickfeld ausnützen, bei exzentrischer Blickrichtung aber nur einen kleinen Teil desselben auf einmal erleuchtet sehen kann. Bei kleiner Pupille und großer Öffnung der Okularlinse kann sogar in zentraler Blickrichtung die Lukenwirkung der Augenpupille auf das Gesichtsfeld zutage treten.

Das Gebiet der physiologischen Methodik, für welches die hier erörterten Fragen von größter Bedeutung sind — die Theorie des Augenspiegels im weitesten Sinne des Wortes — setzt aber auch die Kenntnis der Einwirkung

von anderen schattenwerfenden Körpern voraus. In einem Beleuchtungssystem, wo ein durchlochter Spiegel vorhanden ist, wirkt das Loch auf dieselbe Weise wie in einem dioptrischen System ein schattenwerfender Zentralschirm. Es mag nun in der Fig. 9 AB das Bild einer Blende, CD das eines Zentralschirmes darstellen. Da alles Licht durch das Bild der Blendenöffnung gehen muß, keines durch das des Zentralschirmes kommen kann, so ist es einleuchtend, daß das Viereck ECFD den Vollschatten begrenzt. Wenn bei hinreichend großer Lichtquelle der Lichtweg auf den Strahlen AD und BC im betreffenden Medium bis E frei ist, und diese Strahlen durch sämtliche Bilder der in den vorhergehenden Medien belegenen Öffnungen gehen, so erstreckt sich der Vollschatten in der Figur nicht weiter nach links als bis E. Ähnliches gilt für die Spitze des Schattenkegels in F bezüglich der Strahlen AC und BD. Auf einem beliebigen Achsenpunkte erhält man die Lichtdichte, indem man wie gewöhnlich die Pupille unter den Öffnungsbildern heraussucht und von der Raumwinkelgröße derselben die Raumwinkelgröße des Schirmbildes subtrahiert. Um die Hauptcharaktere der Lichtverteilung auf einer Schirmebene in einem einfachen Falle zu untersuchen, sei angenommen, daß das Lichtquellenbild und sämtliche übrigen Öffnungsbilder links von AB in der Figur gelegen und so groß sind, daß die Strahlen AD und BC durch dieselben gehen. Auf einer rechts von F gelegenen achsensenkrechten Ebene schneiden die durch die Strahlen AC und BD bzw. AD und BC repräsentierten Kegel eine zentrale und eine intermediäre Zone aus. Laut der gemachten Annahme stellt AB hier die Pupille dar und kann eine Vignettierung durch andere Luken nur in der peripheren Zone stattfinden. Projiziert man von einem beliebigen Punkte der Schirmebene aus das Schirmbild auf die Pupillenebene, so findet man, daß die nützliche Pupille in der zentralen Zone ringförmig, in der intermediären sichelförmig und bei hinreichender Größe der Lichtquelle in der peripheren kreisförmig ist. Geht man vom Achsenpunkte aus peripheriewärts auf der Schirmebene, so scheint sich der anfangs zentral in der Pupille gelegene runde Schatten in entgegengesetzter Richtung zu bewegen, um an der Grenze der zentralen Zone zur intermediären den Rand der Pupille zu erreichen und an der Grenze der intermediären Zone zur peripheren das Gebiet derselben zu verlassen. In der zentralen Zone besteht also gar keine, in der intermediären aber eine umgekehrte Vignettierung, indem die Raumwinkelgröße der nützlichen Pupille peripheriewärts zunimmt, während in der peripheren Zone durch Einwirkung der anderen Luken eine gewöhnliche Vignettierung vorhanden ist. Wird nun die Schirmebene auf der Achse nach links in der Figur verschoben, so nimmt die Lichtdichte auf der zentralen, sich stetig verkleinernden Zone immer mehr ab, um in F, wo diese Zone sich auf einen Punkt reduziert hat, gleich Null zu sein. Danach ist die zentrale Zone dunkel und erreicht in CD ihr Querschnittmaximum, während hier die intermediäre Zone verschwindet. In E verschwindet wiederum die zentrale dunkle Zone und erreicht die intermediäre ein relatives Breitenmaximum. Von E ab ist wieder die zentrale Zone hell mit zunehmender Lichtdichte. In AB ist sie allein vorhanden, während jenseits AB die drei Zonen wieder voneinander getrennt sind. Links von CD kann die intermediäre Zone und links von E auch die zen-

trale dem Einflusse der gewöhnlichen Vignettierung durch Luken ausgesetzt werden, und in einem zwischen E und AB gelegenen Punkte hört AB auf, die Pupille darzustellen.

In vielen Problemen, besonders im Gebiete der Ophthalmoskopie bietet der Begriff des Strahlenraumes erhebliche Vorteile. Konstruiert man in einem optischen System sämtliche Strahlen, welche vom ersten Medium in das letzte gelangen können, so bilden dieselben zusammen einen soliden Körper, oder richtiger, da die Strahlen mathematisch nichts anderes sind als Linien, einen Raum, den Strahlenraum des Systems. Werden andererseits sämtliche Öffnungen und schattenwerfende Schirme in einem beliebigen Medium abgebildet, so stellen die geraden Linien, welche durch diese Öffnungen und neben den Schirmen gezogen werden können, die optischen Bilder der durch das System gehenden Strahlen dar und bilden zusammen das Strahlenraumbild des betreffenden Mediums, dessen reeller, d. h. zwischen den beiden das Medium begrenzenden Flächen gelegener Teil mit dem in demselben Medium liegenden Teile des Strahlenraumes identisch ist. Handelt es sich z. B. darum, in einem aus zwei Teilsystemen bestehenden optischen System eine Lichtquelle oder das optische Bild einer solchen derart im ersten Medium anzubringen, daß das Licht durch das erste Teilsystem geht, ohne in das letzte Medium zu gelangen, so hat man dieselbe, bzw. ihr optisches Bild innerhalb des Strahlenraumbildes des ersten Teilsystems, aber außerhalb desjenigen des Vollsystems zu verlegen.

Zieht man von den das Strahlenraumbild ausmachenden Linien nur diejenigen, welche durch einen ausgewählten Punkt gehen und das Bild der Lichtquelle schneiden, so erhält man das nützliche Strahlenraumbild in diesem Punkte, dessen Raumwinkelgröße ersichtlicherweise gleich der der nützlichen Pupille ist. In Fällen komplizierter Vignettierung gelangt man bei Untersuchung dieser am leichtesten zum Ziele, indem man das nützliche Strahlenraumbild durch Projektion ermittelt.

Wie schon oben bemerkt wurde, gelten die hier angeführten Gesetze nur auf der Achse eines Umdrehungssystems und nur bei unendlich kleiner Strahlneigung. Nur wenn das Ideal der kollinearen Abbildung realisierbar wäre, würde das Gültigkeitsgebiet derselben erweitert werden können. Da nun dies nicht der Fall ist, so bleibt nichts anderes übrig, als die Gesetze höherer Ordnung der Lichtverteilung auf dieselbe Weise zu ermitteln wie die der Abbildung, während die Einwirkung von Pupillen, Luken und Zentralschirmen, soweit es sich nur um die Feststellung der Grenze des vignettierten Feldes zu dem mit voller Pupille beleuchteten handelt, durch die exakten Gesetze der optischen Projektion bestimmt ist.

Das geringe Bedürfnis nach den Gesetzen höherer Ordnung der Lichtverteilung macht bis auf weiteres die Entwicklung derselben überflüssig. Man hat aber, wenn man die für unendlich kleine Strahlneigung geltenden Gesetze anwendet, stets im Gedächtnis zu behalten, daß dieselben zwar binnen gewissen Grenzen praktisch anwendbare Approximativwerte geben, daß aber auf der anderen Seite ein aus denselben gezogener Schluß in der Realität nie als exakt angesehen werden darf. Sonst würde man in ein ähnliches Labyrinth von Irrungen hineingeraten, wie es tatsächlich auf dem

Gebiete der optischen Abbildung durch die Anwendung des Sturmschen Konoides geschehen ist.

Hier soll nur der Übergang zu den Realitäten bei endlicher Strahlneigung angedeutet werden. Zunächst kann man sich ohne Schwierigkeit davon überzeugen, daß das Gesetz der spezifischen Lichtstärke und der Lichtdichte auch längs endlich geneigten Hauptstrahlen in einem Umdrehungssystem (wie überhaupt bei zusammensetzbaren Abbildungen) gültig ist, solange Objekt und Blende unendlich klein sind. Damit von einem Bilde des Objektflächenelementes die Rede sein könne, muß längs dem betreffenden Hauptstrahle anastigmatische Abbildung desselben vorliegen. Man hat dann in der oben angewendeten Deduktion bei reeller Eintrittspupille das Bild derselben am bequemsten auf die erste Fokalebene im Strahlenbündel der Austrittspupille zu projizieren, indem das Zentrum von o′ als Projektionszentrum dient, und mit beiden Abbildungen gesondert zu rechnen. Es ergibt sich auf diese Weise

$$p' = \frac{z_1 z_{11} b_1}{b_{11}} \cdot p \qquad o' = K_1 K_{11} o$$

wonach das Gesetz der spezifischen Lichtstärke aus den betreffenden Abbildungsgleichungen erhalten wird. Wenn auch die Eintrittspupille ein astigmatisches Bild darstellt, hat man damit analog zu verfahren. Auf ähnliche Weise ergibt sich das Gesetz der Lichtdichte, wobei man nur zu bemerken hat, daß allgemein die Raumwinkelgröße dem Produkte der Winkeldurchmesser in den beiden Hauptschnitten proportional ist. Bei astigmatischer Abbildung des Objektes sind die Fokalebenen auf dieselbe Weise zu behandeln wie andere Querschnitte des Lichtstromes. Um die Lichtdichte auf der ersten Fokalebene zu finden, hat man somit den Winkeldurchmesser des auf der zweiten Fokalebene liegenden Bildes zu bestimmen, welches durch den Abstand der äußersten hier abgebildeten Bildlinien bestimmt ist. Erst wenn dieser Winkeldurchmesser die Größe desjenigen der Austrittspupille erreicht, erhält der betreffende Querschnitt die volle Beleuchtung, indem es dann erst ausgeschlossen ist, daß das Bild des lichtaussendenden Objektes als Austrittspupille wirkt.

Bisher wurde angenommen, daß das Objekt senkrecht auf der Achse bzw. auf dem Hauptstrahle stehe. Wenn aber die Objektfläche vollkommen eben ist, so ist die von einem Flächenelemente desselben in schiefer Richtung ausgesendete Lichtmenge gleich dem Produkte der in senkrechter Richtung ausgesendeten mit dem Kosinus des von den beiden Richtungen eingeschlossenen Winkels. Auf der anderen Seite ist die senkrechte Querschnittgröße der Lichtröhre gleich dem Produkte der Größe des Flächenelementes mit demselben Kosinus, woraus folgt, daß die durch einen senkrechten Querschnitt der Lichtröhre gehende Lichtmenge von der Neigung der Objektfläche auf den Hauptstrahl unabhängig ist. Da vollkommen ebene Flächen nicht vorkommen, so ist dieses sogenannte Kosinusgesetz nicht mit absoluter Exaktheit auf physikalische Verhältnisse anzuwenden, sondern kommen Abweichungen von demselben vor, welche durch die Oberflächenbeschaffenheit bedingt werden. Für die Zwecke der physiologischen Methodik ist es aber hinreichend genau. Laut demselben Kosinusgesetze erhält man

die Beleuchtungsstärke in einem Flächenpunkte, wenn man die Lichtdichte mit dem Kosinus des Neigungswinkels des Hauptstrahles zur Flächennormale multipliziert.

Die Beleuchtungsstärke eines Flächenpunktes bei unendlich kleiner Blende ergibt bei endlicher Blendengröße den Differentialquotienten der Funktion, in welcher die Beleuchtungsstärke als von der Orientierung des Hauptstrahles abhängig dargestellt wird, und man erhält demnach die tatsächliche Beleuchtungsstärke bei endlicher Blendengröße durch eine Integration. Auf einer achsensenkrechten Ebene erhält man auf diese Weise ohne Schwierigkeit die Beleuchtungsstärke im Schnittpunkte mit der Achse bei endlicher Pupillengröße, wenn das Objekt hinreichend groß und gleichmäßig hell ist und das Kosinusgesetz als gültig angenommen wird. An das Objekt wird die Forderung gestellt, daß jeder vom betreffenden Achsenpunkte gezogene Strahl, rückwärts in den Objektraum verlängert, dasselbe schneidet, und daß in den Schnittpunkten die spezifische Lichtstärke konstant ist und die Oberflächenbeschaffenheit die Anwendung des Kosinusgesetzes erlaubt. Es ist dann die gesamte Beleuchtungsstärke auf dem Achsenpunkte

$$E' = c' \cdot \pi \sin^2 \vartheta'$$

wo ϑ' der Neigungswinkel des äußersten Strahles im Schirmraume ist. Auf das optische Bild kann dieses Gesetz somit allgemein angewendet werden, sobald das Objekt die Größe des Zerstreuungskreises bei Umkehrung des Strahlenganges hat. Das Problem der gesamten Beleuchtungsstärke auf einem in endlichem Abstande von der Achse gelegenen Punkte bei endlicher Blendenöffnung zu finden, ist viel komplizierter. Hier soll nur darauf hingewiesen werden, daß dieselbe mit zunehmender Entfernung immer mehr abnimmt, so daß der Effekt einer Vignettierung ohne Einwirkung von Luken entsteht.

Wie aus dem Obenstehenden hervorgeht, ergeben die exakten Gesetze erster Ordnung der Lichtverteilung in optischen Instrumenten nur die Differentiale der Lichtdichte oder der Beleuchtungsstärke längs den verschiedenen Strahlen, und muß die Untersuchung dieser Größen allgemein für verschiedene Punkte des optischen Bildes oder einer Schirmebene wiederholt werden. Es wird somit bei der Anwendung derselben vorausgesetzt, daß sowohl Objekt wie Blende eine endliche Ausdehnung haben. Wenn man an Stelle der exakten Gesetze die bei unendlich kleiner Strahlneigung geltenden anwendet, so geschieht auch hierdurch kein Schaden, solange man sich bewußt ist, daß auf diese Weise nur approximative Werte erhalten werden, d. h. solange man nicht die Fiktion macht, daß diese Gesetze für endliche Strahlneigung gültig sind. Man würde sonst ein dem Ideale der kollinearen Abbildung analoges Ideal aufstellen und mit diesem Ideale als mit einer Realität rechnen.

Wie die in der nächsten Umgebung des Achsenpunktes bei unendlich kleiner Blende mathematisch exakten Gesetze der kollinearen Abbildung ihre Gültigkeit verlieren, sobald die Bedingungen derselben physikalisch nachgeahmt werden, indem bei sehr kleiner Blendenöffnung die Diffraktion des Lichtes die Abbildung vereitelt, ebenso hört das Gesetz der spezifischen Lichtstärke der optischen Bilder auf, zu gelten, sobald die Bedingung, unter

welcher es oben hergeleitet wurde, nämlich daß die Raumwinkelgröße des Objektes unendlich klein ist, physikalisch nachgeahmt wird. Bei der physikalischen Abbildung durch Licht kann nämlich wegen der Diffraktion — auch wenn keine Aberration vorhanden wäre — ein mathematischer Punkt nur als endlich ausgedehnte Fläche abgebildet werden. Bei der Abbildung eines endlich großen, aber unendlich entfernten Objektes ist bei endlicher Größe der Eintrittspupille die durch einen Querschnitt der Lichtröhre in der Zeiteinheit gehende Lichtmenge exakt durch den oben angegebenen Wert $\frac{e\,o\,p}{a^2}$ definiert, während, wenn nunmehr o' die Größe der kleinen Fläche angibt, welche bei der physikalischen Abbildung an Stelle des mathematischen Punktes tritt, die Beleuchtungsstärke in derselben auf einer achsensenkrechten Schirmebene gleich $e'\,\pi \sin \vartheta'$ ist. Die Gleichung

$$\frac{c\,o\,p}{a^2} = k\,e'\,o'\,\pi \sin^2 \vartheta'$$

wo k eine von der Diffraktion und der Aberration abhängige Größe darstellt, nimmt dann für ein und dasselbe Objekt bei konstanter Austrittspupille die Form

$$c' = \frac{p\,C}{k\,o'}$$

an, wo C eine Konstante darstellt. Es folgt hieraus, daß die spezifische Lichtstärke des Bildes, welche von vornherein unendlich klein ist im Verhältnis zu der des Objektes, bei zunehmender Größe der Eintrittspupille zunimmt, solange die Austrittspupille unverändert bleibt und die Größe $k\,o'$ nicht in derselben Proportion wächst wie die Größe der Eintrittspupille. Dieser Fall ist nun bei der Kombination des Auges mit einem Fernrohre realisiert, wenn der Durchmesser der Eintrittspupille des bewaffneten Auges, d. h. in astronomischen und bei hinreichender Vergrößerung auch in Galileischen Fernrohren der Durchmesser der Objektivöffnung in derselben Proportion vergrößert wird, wie man die Vergrößerung des Instrumentes steigert. Hierauf beruht es, daß um so mehr Sterne sichtbar sind und photographiert werden können, je größer die Objektivöffnung des Instrumentes ist, und daß bei hinreichender Größe derselben und entsprechender Vergrößerung des Instrumentes die Sterne auch bei Tag sichtbar sind, indem die Beleuchtungsstärke auf den Bildern derselben, nicht aber auf dem Bilde des Himmels durch die Vergrößerung vermehrt wird. Daß dies ganz unabhängig von der Größe und räumlichen Verteilung der lichtperzipierenden Elemente der Netzhaut bzw. vom Korn der photographischen Platte der Fall sein muß, dürfte aus dem Obenstehenden hervorgehen. In neuerer Zeit werden zwar von physikalischer Seite[1]) diese Momente in den Vordergrund geschoben, aber es dürfte, wie ersichtlich, schon die schlichte Erklärung, die Helmholtz[2]) unter Hinzuziehung der kleinsten Zerstreuungskreise gab, der Wahrheit näher kommen.

1) Vgl. S. Czapski, Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach Abbe. S. 244, 247. Leipzig 1904.

2) Handbuch der physiologischen Optik. 3. Aufl., Bd. I. S. 204. 1909.

6. Das Auge in Verbindung mit optischen Instrumenten.

Die optische Einstellung des Auges — die Refraktion desselben — wird am besten durch die reduzierte Konvergenz des im Auge einfallenden Strahlenbündels gemessen, welches nach der Brechung im optischen System einen Fokalpunkt auf der Netzhaut hat. Es folgt hieraus, daß der Abstand des scharf gesehenen Objektes, wenn dasselbe reell ist, einen negativen Wert hat. Die reduzierte Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels kann in einem beliebigen Punkte gemessen werden. Wegen der Einfachheit der Rechnungen empfiehlt es sich aber, hierzu den vorderen Hauptpunkt des brechenden Apparates zu wählen. In der auf die Hauptpunkte bezogenen allgemeinen Abbildungsgleichung

$$B = A + D$$

ist dann A die in Dioptrien ausgedrückte Refraktion des Auges, D die Brechkraft des optischen Systems und $\frac{1}{B} = b$ der reduzierte Abstand der Netzhaut vom hinteren Hauptpunkte, während $\frac{1}{A} = a$ den reduzierten Abstand des scharf gesehenen Punktes vom vorderen Hauptpunkte bedeutet. Wenn, wie gewöhnlich, das vor dem Auge befindliche Medium Luft ist, so ist der reduzierte Abstand gleich dem wirklichen Abstand. Es empfiehlt sich aber, die Formeln von vornherein auch für den Fall zu deduzieren, wo andere Medien vorliegen, damit dieselben z. B. auch für das Sehen unter Wasser direkt verwendet werden können, und es wird deshalb im folgenden überall von reduzierter Konvergenz und reduzierten Abständen gesprochen werden. Bei $A = 0$ ist das Auge emmetropisch, während bei positivem bzw. negativem Werte von A Hypermetropie bzw. Myopie vorliegt. Bei Astigmatismus des Auges ist wiederum die Refraktion desselben in den beiden Hauptschnitten verschieden, und der Grad des Astigmatismus wird eben durch den Refraktionsunterschied gemessen. Da durch die Akkommodation die optische Einstellung des Auges verändert wird, so gibt es eine innerhalb der vom Fernpunkt und Nahepunkt gegebenen Grenzen belegene Unendlichkeit von Refraktionszuständen. Wenn r p den reduzierten Abstand des Fernpunktes bzw. Nahepunktes vom ersten Hauptpunkt darstellen, R P die entsprechenden reduzierten Konvergenzwerte sind, so kann das Auge jede zwischen diesen Werten belegene Refraktion haben, und die Differenz

$$R - P$$

ist die Akkommodationsbreite, indem durch die Akkommodation zwar die Brechkraft des optischen Systems vermehrt, die Refraktion aber vermindert wird. Wenn aber schlechthin von der Refraktion des Auges gesprochen wird, so versteht man darunter die Einstellung auf den Fernpunkt in Luft.

Wird die Refraktion in einem beliebigen Punkte M gemessen, dessen Ort dadurch bestimmt ist, daß der reduzierte Abstand des ersten Hauptpunktes des Auges von demselben gleich m ist, und welcher somit bei positivem m vor dem Auge liegt, so hat man, wenn die Refraktion im Punkte m mit A_m bezeichnet wird,

$$\frac{1}{A_m} = \frac{1}{A} + m$$

woraus sich ergibt

$$A_m = \frac{A}{1 + m\,A} \qquad A = \frac{A}{1 - m\,A_m}$$

Im Falle $m = \frac{1}{D}$ ist $A_m = L$, indem die reduzierte Konvergenz des im Auge einfallenden Strahlenbündels im vorderen Brennpunkte desselben gemessen wird. Ist m gleich dem Abstand, in welchem eine Brille vor dem Auge getragen wird, so pflegt auch A_m als die Gläserrefraktion oder als Korrektionswert der Refraktion bezeichnet zu werden. Der reduzierte Gesichtswinkel eines scharf gesehenen Objektes oder optischen Bildes mit dem Durchmesser α sei im Punkte M gemessen und durch die Beziehung

$$\omega^m = \alpha\,A_m$$

definiert, so daß derselbe bei reellem Objekte einen negativen Wert hat. Wenn M mit dem ersten Hauptpunkt bzw. mit dem ersten Brennpunkt des Auges zusammenfällt, sei der betreffende Winkel mit $\omega_h = \alpha A$ bzw. $\omega_f = \alpha L$ bezeichnet und als der reduzierte Hauptpunkt- bzw. Fokalpunktwinkel gekennzeichnet. Das Verhältnis der Netzhautbildgröße β zu diesen Winkeln ergibt sich aus den allgemeinen Abbildungsgleichungen

$$KB = A \qquad KD = L$$

in welchen es bei der geringen Größe des auf einmal scharf gesehenen Gegenstandes erlaubt ist, K durch $\frac{\beta}{\alpha}$ zu ersetzen. Man erhält

$$\frac{\beta}{\omega_h} = b \qquad \frac{\beta}{\omega_f} = \frac{1}{D}$$

woraus hervorgeht, daß das Verhältnis der Netzhautbildgröße zum Fokalpunktwinkel nur von der Brechkraft des optischen Systems, das Verhältnis derselben zum Hauptpunktwinkel nur von der reduzierten Achsenlänge des Auges abhängig ist.

Da nun die vorkommenden Variationen der Brechkraft des optischen Systems des Auges in der Regel von der Ametropie unabhängig sind, diese wiederum gewöhnlich durch eine Veränderung der reduzierten Achsenlänge des Auges bedingt wird, so stellt der Fokalpunktwinkel allgemein ein von der Refraktion unabhängiges Maß der Netzhautbildgröße dar. Auf der anderen Seite verschieben sich die Hauptpunkte des Auges bei den praktisch in Betracht kommenden Graden der Akkommodation so wenig, daß es erlaubt ist, die reduzierte Achsenlänge als von derselben unabhängig anzusehen, woraus folgt, daß der Hauptpunktwinkel ein von der Akkommodation des Auges unabhängiges Maß des Netzhautbildes darstellt.

Im allgemeinen Falle erhält man aber aus der Gleichung

$$\varkappa_m\,K\,B_m = A_m$$

wo $\varkappa_m$ den Vergrößerungskoeffizienten in dem dem Punkte M konjugierten Punkte und B_m den reziproken Wert des reduzierten Abstandes der Netzhaut von demselben darstellt, ein Maß, welches sowohl vom Grade der Ametropie wie von der Akkommodation abhängig ist. Man hat nämlich

$$\varkappa_m = \frac{1}{1 - m\,D} \qquad \frac{1}{B_m} = b + \frac{m}{1 - m\,D}$$

und erhält somit

$$\frac{\beta}{\omega_m} = \frac{1}{\varkappa_m B_m} = m + b\,(1 - m\,D)$$

welcher Ausdruck für $m = 0$ bzw. $m = \frac{1}{D}$ in die oben angeführten, den Hauptpunkt- bzw. den Fokalpunktwinkel enthaltenden Formeln übergeht.

Unter Anwendung der verkürzten Bezeichnung

$$m_0 = m - \frac{1}{D}$$

lassen sich die Relationen der verschiedenen Winkel ω zueinander in folgenden Gleichungen zusammenfassen:

$$\omega_m : \omega_h : \omega_f = \frac{B}{m\,B - m_0\,D} : B : D = A_m : A : L =$$
$$= 1 : (1 + m\,A) : (1 + m_0\,L) = (1 - m\,A_m) : 1 : \left(1 - \frac{L}{D}\right) =$$
$$= (1 - m_0\,A_m) : \left(1 + \frac{A}{D}\right) : 1$$

welche durch oben angegebene Beziehungen leicht verifiziert werden können.

Wird ein optisches System mit dem des Auges kombiniert, so ist ersteres als das erste Teilsystem zu bezeichnen, indem die positive Richtung als mit der Bewegungsrichtung des beim Sehen wirksamen Lichtes zusammenfallend gewählt wird. Um aber die schon angewendeten Bezeichnungen nicht zu ändern, seien für das zweite Teilsystem, das optische System des Auges, die Buchstaben DAL usw. wie oben angewendet, während die entsprechenden Größen in bezug auf das erste Teilsystem mit $D_0\,A_0\,L_0 \ldots$ und betreffend das Vollsystem — das optische System des bewaffneten Auges — mit $D_t A_t L_t$ usw. bezeichnet werden. Die lineare Größe des Gegenstandes ist somit α_0, während $\beta_0 = \alpha$ die Größe des vom ersten Teilsystem entworfenen und vom Auge gesehenen optischen Bildes desselben darstellt. Ferner sei δ_m bzw. Δ_m der reduzierte Abstand des Punktes M vom zweiten Hauptpunkt bzw. vom zweiten Brennpunkt des ersten Teilsystems und seien diese Abstände für $m = 0$ bzw. $m = \frac{1}{D}$ mit $\delta\,\Delta$ bzw. $\delta_f\,\Delta_f$ bezeichnet, so daß die Beziehungen

$$\delta = \Delta + \frac{1}{D_0} = \delta_f + \frac{1}{D} = \delta_m + m$$
$$\delta_f = \Delta_f + \frac{1}{D_0} \qquad \delta_m = \Delta_m + \frac{1}{D_0}$$

gelten, wenn das erste Teilsystem nicht afokal ist. Aus den Formeln (3b) bis (3e) ergeben sich dann folgende Werte für das bewaffnete Auge

$$D_t = D_0 (1 - \Delta D) = D (1 - \delta_f D_0) = - \Delta_f D D_0$$

$$H_t = \frac{\delta}{1 - \delta_f D_0} = - \frac{\delta}{\Delta_f D_0} \qquad ' = - \frac{\delta D_0}{D (1 - \delta_f D_0)} = \frac{\delta}{\Delta_f D}$$

Allgemein ist

$$B_0 = A_0 + D_0 \qquad L_0' = - \frac{D_0^2}{L_0} \qquad A_m = \frac{B_0}{1 - \delta B_0} = \frac{L_0'}{1 - \Delta_m L_0'}$$

und man erhält somit die Refraktion des Auges im Punkte M aus den Konstanten des vorgeschalteten Systems und dem Ort des Gegenstandes durch die Beziehungen

$$A_m = \frac{A_0 + D_0}{1 - \delta_m (A_0 + D_0)} = - \frac{D_0^2}{L_0 + \Delta_m D_0^2}$$

welche für $\delta = 0$ bzw. $\delta_f = 0$ die Werte

$$A = A_0 + D_0 \text{ bzw. } L = A_0 + D_0$$

und für $\Delta = 0$ bzw. $\Delta_f = 0$ die Werte

$$A = - \frac{D_0^2}{L_0} \text{ bzw. } L = - \frac{D_0^2}{L_0}$$

ergeben. Diese vier Spezialfälle sind überdies auf folgende Weise charakterisiert. Bei $\delta = 0$ ist die Brechkraft des Vollsystems gleich der Summe der Brechkraftwerte der Teilsysteme, und der vordere Hauptpunkt des Auges wird durch Vorschalten des ersten Teilsystems um den Betrag des Hauptpunktsinterstitiums desselben nach vorn verschoben, während der hintere Hauptpunkt unbeeinflußt bleibt. Bei $\delta_f = 0$ wird die Brechkraft des optischen Systems des Auges durch die Bewaffnung nicht verändert, der vordere Hauptpunkt rückt wiederum um den Betrag des Hauptpunktsinterstitiums des vorgeschalteten Systems nach vorn, während der hintere Hauptpunkt um die reduzierte Strecke $\frac{D_0}{D^2}$ gleichfalls nach vorn rückt. Bei $\Delta = 0$ ist die Brechkraft des Vollsystems gleich der des ersten Teilsystems, und der erste Hauptpunkt desselben liegt im Abstande $\frac{D}{D_0^2}$ vom gleichnamigen Hauptpunkt des vorgeschalteten Systems dem Auge näher, während der zweite Brennpunkt des Vollsystems mit dem zweiten Hauptpunkte des Auges zusammenfällt. Endlich ist bei $\Delta_f = 0$ das Vollsystem afokal mit dem Vergrößerungskoeffizienten $- \frac{D_0}{D}$ und der erste Brennpunkt des ersten Teilsystems dem hinteren Brennpunkte des Auges konjugiert.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Netzhautbildgröße von der Objektgröße im Vollsystem empfiehlt es sich, da die Beziehungen der ersteren zu den verschiedenen Winkeln ω_m schon ermittelt worden sind,

die Beziehungen dieser Winkel zur Größe des Objektes bzw., wenn dasselbe unendlich weit entfernt ist, zur Winkelgröße desselben zu untersuchen. Werden aus der Gleichung

$$\beta_0 B_0 = \alpha_0 A_0$$

unter Anwendung obenstehender Formeln A_0 und B_0 eliminiert, so erhält man für die Vergrößerung eines optischen Instrumentes

$$-\frac{\omega_m}{\alpha_0} = D_0 - A_m (1 - \delta_m D_0) = D_0 (1 + \Delta_m A_m)$$

in welcher Formel das negative Vorzeichen von der umgekehrten Abbildung im Auge herrührt, da die Winkel ω_m direkt der Netzhautbildgröße proportional sind. Für den Fall eines unendlich entfernten Objektes stellt $\alpha_0 A_0$ die Winkelgröße desselben dar, welche somit bei reellem Objekt negativ ist. Man hat dann nur B_0 zu eliminieren und erhält, nachdem $A_0 = 0$ gesetzt worden ist,

$$\frac{\omega_m}{\alpha_0 A_0} = \frac{1}{1 - \delta_m D_0} = 1 + \delta_m A_m$$

Bei $D_0 = 0$, wenn also das vorgeschaltete System afokal ist, verlieren diese Formeln ihre Gültigkeit. Man hat dann nur die reduzierte Konvergenz A_0 des in das vorgeschaltete System einfallenden Strahlenbündels in dem dem Punkte M konjugierten Punkte zu messen und erhält

$$\frac{\omega_m}{\alpha_0 A_0} = k$$

wo k den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten des afokalen Systems darstellt. Für den Fall eines endlich entfernten Objektes kann man A_0 mit der Gleichung

$$A_m = B_0 = k^2 A_0$$

eliminieren, wodurch sich ergibt

$$-\frac{\omega_m}{\alpha_0} = -\frac{A_m}{k}$$

Will man die allgemeingiltige Vergrößerungsformel haben, so läßt man am einfachsten $\varkappa_0$ den Vergrößerungskoeffizienten im Punkte M darstellen und mißt die reduzierten Konvergenzen $B_0 = A_m$ bzw. A_0 in diesem Punkte bzw. in dem demselben im Objektmedium konjugierten Punkte. Aus den allgemeinen Abbildungsgleichungen (1) erhält man dann die beiden Ausdrücke

$$-\frac{\omega_m}{\alpha_0} = D_0 - \varkappa_0 A_m \qquad \frac{\omega_m}{\alpha_0 A_0} = \frac{1}{\varkappa_0}$$

welche, da einesteils bei endlichem Brechkraftwerte $\varkappa_0 = 1 - \delta D_0$ ist, anderenteils der in afokalen Systemen überall konstante reduzierte anguläre

Vergrößerungskoeffizient mit dem reziproken Werte von $\varkappa_0$ zusammenfällt die oben deduzierten Formeln enthalten.

Was den Begriff der Vergrößerung eines optischen Instrumentes betrifft, so kann bei unendlich entfernten Gegenständen nur von dem Verhältnis einer Winkelgröße zu einer Winkelgröße die Rede sein, die Vergrößerung somit nur durch eine Zahl gemessen werden. Andererseits ist bei starker Brechkraft und kleinen Gegenständen ein solches Maß der Vergrößerung ohne die Einführung einer willkürliehen Größe praktisch unanwendbar. Will man in diesen Fällen ein von willkürliehen Größen unabhängiges Maß der Vergrößerung haben, so muß man das Verhältnis einer Winkelgröße zu einer lineären Größe messen, wobei das Maß nicht mehr eine dimensionslose Zahl darstellt, sondern die physikalische Dimension der Brechkraft hat. Wollte man nämlich den Abstand des Objektes vom Auge zur optisehen Projektion des Netzhautbildes benutzen, so würde das Maß der Vergrößerung von der Länge des Instrumentes abhängig sein, und z. B. ein einfaches und ein zusammengesetztes Mikroskop, welche bei gleicher Objektgröße, vom Vorzeichen abgesehen, gleiche Netzhautbilder geben, würden quantitativ verschiedene Vergrößerungswerte haben. Diese Projektion kann somit nur dann angewendet werden, wenn der Objektabstand groß im Verhältnis zur Brechkraft des Systems ist. Will man für andere Fälle eine dimensionslose Zahl haben, so muß man die konventionelle Projektionsweite anwenden, welche 25 em beträgt und oft irrtümlich mit der „deutlichen Sehweite“ verwechselt wird. Soll der Vergrößerungswert zu einem Vergleich verschiedener optischer Systeme angewendet werden, so darf derselbe keine von der optischen Einstellung des Auges abhängigen Werte enthalten. Da nun die emmetropische Refraktion als die physiologische zu betrachten ist, und geübte Beobaehter die Akkommodation bei der Anwendung optischer Instrumente entspannen, so ist in den Formeln $A_m = 0$ zu setzen, wenn der Wert der absoluten Vergrößerung des Instrumentes erhalten werden soll. Dieselbe wird somit bei afokalen Instrumenten durch den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten, also durch einen Zahlenwert, sonst aber durch einen Dioptrienwert angegeben, welcher mit der Brechkraft des Systems zusammenfällt. Wird die Dioptrienzahl durch 4 dividiert, so ergibt sich der konventionelle Zahlenwert der Vergrößerung. Derselbe wird im Gebiete der technischen Optik allgemein angewendet und gibt das Verhältnis der Netzhautbilder an, wenn das emmetropische Auge einen und denselben Gegenstand einmal bei entspannter Akkommodation im Instrument, einmal bei einer Akkommodation von 4 Dioptrien in 25 cm Abstand vom vorderen Hauptpunkte des Auges scharf sieht. Bei Instrumenten mit endlichem, aber niedrigem Werte der Brechkraft genügt zwar die Kenntnis derselben und der Lage des ersten Fokalpunktes zur Beurteilung der Leistung, der konventionelle Zahlenwert eignet sich aber weniger dazu. Wenn z. B. ein achtmal vergrößerndes, auf unendliche Ferne eingestelltes Fernrohr hinter eine positive Linse von $^1/_2$ dptr Brechkraft gehalten wird, so resultiert ein optisches System von 4 dptr, dessen vorderer Brennpunkt 2 m vor dem vorderen Hauptpunkte der Linse liegt, und der konventionelle Zahlenwert ist 1, woraus man schließen möchte, daß das System weder vergrößert noch verkleinert. In solchen Fällen wird die Leistung des Instrumentes besser geschätzt, wenn

man den absoluten Nutzeffekt durch einen von Eschricht und Panum[1]) eingeführten, irrtümlicherweise auf die Knotenpunkte bezogenen Zahlenwert mißt, indem das Netzhautbild auf die Ebene des Objektes projiziert wird In afokalen Systemen fällt dieser Wert mit der der absoluten Vergrößerung zusammen, in anderen Systemen erhält man denselben, wenn der Dioptrienwert mit $h + \frac{1}{D_0}$ multipliziert wird, wo h den reduzierten Abstand des ersten Hauptpunktes des Auges vom ersten Hauptpunkte des Systems darstellt und als dem vor dem Auge belegenen Medium in seiner Totalität angehörend angesehen wird. Der Wert des absoluten Nutzeffektes ist somit

$$1 + h D_0$$

und ergibt im oben gewählten Beispiel, wenn der Abstand des vorderen Hauptpunktes des Auges von dem der Konvexlinse 25 cm beträgt, wobei $h = 2$ m wird, eine neunfache Vergrößerung. Aueh die Leistung einer Presbyopenlinse von 4 dptr wird auf diese Weise richtig geschätzt.

Solange es sich um die absoluten Werte handelt, verschwindet δ aus der Formel, so daß der Punkt M beliebig gewählt werden kann. Bei der Ermittelung der individuellen Vergrößerung ist dies nicht mehr der Fall, sondern man muß, um Zahlenwerte zu erhalten, welche die Verhältnisse der Netzhautbildgrößen richtig angeben, dafür sorgen, daß diese den Winkeln ω proportional sind. In den Fällen, wo das Auge in 25 cm Abstand bzw. im Abstand des Objektes scharf sehen kann, geben die Zahlenwerte einen durch Versuehe realisierbaren Vergleich zwischen den Netzhautbildgrößen bei zwei verschiedenen Akkommodationszuständen an, woraus folgt, daß der Hauptpunktwinkel angewendet werden muß, wenn die Zahlenwerte die Realitäten angeben sollen. Man erhält somit die individuelle Vergrößerung, wenn in den allgemeinen Formeln $\omega_h \delta \Delta A$ für ω . . . gesetzt wird. Für eine gewöhnliche Lupe findet man, daß bei negativem Werte von Δ die individuelle Vergrößerung bei der Akkommodation wächst und bei hypermetropischer Refraktion kleiner, bei myopischer aber größer ist als die absolute, während bei $\Delta > 0$ genau das umgekehrte Verhalten stattfindet. Fällt wiederum der zweite Brennpunkt der Linse mit dem ersten Hauptpunkt des Auges zusammen, so ist die individuelle Vergrößerung unabhängig vom Akkommodationszustande und in allen Augen gleich der absoluten. Es ist aber hierbei wohl zu bemerken, daß diese Kombination in den verschiedenen Augen nicht gleich große Netzhautbilder gibt. Dann würde tatsächlich die Vergrößerung nicht gleich sein, da nämlich die Netzhautbildgröße eines 25 cm entfernten Gegenstandes von der Achsenlänge des Auges abhängig ist. Den individuellen Nutzeffekt mißt man am besten durch Projektion des Netzhautbildes in den Abstand der individuellen Sehweite, worunter der kürzeste Abstand verstanden wird, in welchem das unbewaffnete Auge ohne Übermüdung ein reelles Objekt am schärfsten sieht. (Bei virtuellem Nahepunkt ist somit die individuelle Sehweite unendlich groß.)

---

1) P. L. Panum. Die scheinbare Größe der gesehenen Objekte. Arch. f. Ophth., V. 1859. S. 1.

Das hier über die Vergrößerung Gesagte läßt sich in den folgenden Ausdruck zusammenfassen:

$$V = -\frac{\omega_h\, s}{\alpha_0} = s\, D_0\, (1 + \Delta A) = s\, (D_0 - \varkappa_0\, A) = -\frac{s\, A_0}{\varkappa_0}$$

wo die reduzierte Konvergenz A_0 in dem im Objektmedium dem ersten Hauptpunkte des Auges konjugierten Punkte gemessen wird, und $\varkappa_0$ den Vergrößerungskoeffizienten in diesen beiden Punkten darstellt. Wird bei endlichem Werte der Brechkraft s gleich der Zahl eins und A = O gesetzt, so stellt V die absolute Vergrößerung dar, während die individuelle Vergrößerung erhalten wird, wenn für A die Refraktion des betreffenden Auges eingesetzt wird. Stellt wiederum s mit positivem Vorzeichen und in Metern gemessen, die konventionelle Projektionsweite, bzw. den reduzierten Objektabstand, bzw. die individuelle Sehweite dar, so ist V der konventionelle Zahlenwert der Vergrößerung bzw. der absolute Nutzeffekt, bzw. der individuelle Nutzeffekt, wenn A in den beiden erstgenannten Fällen gleich Null, im letztgenannten gleich der Refraktion des Auges gesetzt wird. Bei unendlich großem Werte von s hat man $-s\,A_0 = 1$ zu setzen. Für afokale Systeme wird die absolute Vergrößerung durch den absoluten Nutzeffekt angegeben. Positives Vorzeichen von V bedeutet eine ohne scheinbare Umkehrung erfolgende Vergrößerung. Die ganze Herleitung ist nur für so kleine Bilder gültig, daß das Auge beim Sehen ruhig gehalten wird. Wenn dies nicht der Fall ist, so gilt dieselbe nur für die Detailvergrößerung, während die Größe ausgedehnter Objekte nach der Winkelbewegung des Auges geschätzt wird. Um beim Sehen mit bewegtem Auge die Vergrößerung durch optische Instrumente zu berechnen, hat man deshalb den Punkt M in den Drehpunkt des Auges zu verlegen, wobei aber zu bemerken ist, daß die Gesetze erster Ordnung nur Annäherungswerte ergeben.

Wenn hier von der individuellen Vergrößerung die Rede gewesen ist, so hat man bei der Anwendung der Formeln auf Instrumente, deren Konstanten individuell variiert werden, zu beachten, daß in die Formeln die Konstanten des vom betreffenden Individuum angewendeten optischen Systems eingesetzt werden. Solche Instrumente sind vor allem Fernrohre mit veränderlichem Auszug. Unter der Voraussetzung, daß der Abstand des Objektes vom Objektiv unverändert bleibt, kann man die mit solchen Instrumenten erhaltene Netzhautbildgröße in verschiedenen Augen bzw. bei verschiedenen Akkommodationszuständen am einfachsten dadurch vergleichen, daß man für α_0 das vom Objektiv entworfene Bild einführt und in den Formeln der Vergrößerung die Konstanten des Okulares benutzt. Die auf diese Weise erhaltene individuelle Vergrößerung eines veränderlichen Instrumentes ist also bei der Benutzung eines Fernrohres auf großen Abstand, wenn k den reduzierten angulären Vergrößerungskoeffizienten desselben bei afokaler Einstellung und Δ_2 den reduzierten Abstand des ersten Hauptpunktes des Auges vom zweiten Brennpunkte des Okulares darstellt, gleich $k\ (1 + \Delta_2\, A)$.

Die oben angegebenen Formeln dienen auch zur Messung der Fokal- und Hauptpunktwinkel, indem bei der Erfüllung einer der Bedingungen

$$\delta = 0 \qquad \delta_f = 0 \qquad \Delta = 0 \qquad \Delta_f = 0$$

die bezüglichen Relationen

$$\omega_h = \alpha_o A_o \qquad \omega_f = \alpha_o A_o \qquad \omega_h = -\alpha_o D_o \qquad \omega_f = -\alpha_o D_o$$

die Mittel der Messung angeben.

Die Beweise der hier gegebenen Darstellung der Realitäten der Dioptrik habe ich in folgenden Schriften niedergelegt.

Beitrag zur Theorie des Astigmatismus. Skand. Arch. f. Physiol. Bd. 2 1890, S. 269. — Allgemeine Theorie der monochromatischen Aberrationen und ihre nächsten Ergebnisse für die Ophthalmologie. Nova Acta Reg. Soc. Sc. Ups. Ser. III Bd. 20 1900. — Zur Kenntnis der Kreispunkte. Acta Mathematica. Bd. 29 1904. — Die reelle optische Abbildung. Kungl. Sv. Vet. Akad. Handl. Bd. 41 1906. — Die optische Abbildung in heterogenen Medien und die Dioptrik der Kristallinse des Menschen. Ebenda Bd. 43 1906.

Einfachere Fragen sind auch in folgenden Schriften gelöst, in welchen ich mich bemüht habe, die Darstellung dem in der Differentialgeometrie nicht Bewanderten möglichst zugänglich zu machen.

Über die Bedeutung der Dioptrie. Arch. f. Ophth. Bd. 49 1899, S. 46. — Die Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels. Ebenda Bd. 53 1901, S. 105. — Über Astigmatismus, Koma und Aberration. Ann. d. Physik. 4 Folge, Bd. 18 1905, S. 941. — Tatsachen und Fiktionen in der Lehre von der optischen Abbildung. Arch. f. Optik, Bd. 1 1907, S. 2. — Om afbildningen i ögat. Hygiea, Festband 1908. — Handbuch der physiologischen Optik von H. v. Helmholtz, 3. Aufl. Bd. 1. Die Dioptrik des Auges. Hamburg und Leipzig 1909. Zusätze S. 226—376.

Die ältere Lehre findet man in dem Helmholtzschen Texte des letztgenannten Handbuches. Die Abbesche Lehre ist zusammengestellt bei S. Czapski, Grundzüge der Theorie der optischen Instrumente nach Abbe. 2. Aufl. Leipzig 1904. Zugleich im Handbuch der Physik von A. Winkelmann, Bd. 6.

II. Objektive Beobachtungsmethoden.

I. Ophthalmoskopie.

Unter den ophthalmoskopischen Methoden im weitesten Sinne des Wortes, d. h. unter den dem Gebiete der Dioptrik zugehörigen Methoden zur Untersuchung der verschiedenen Teile des Auges, hat die Ophthalmoskopie im engeren Sinne des Wortes, die Beobachtung des Augenhintergrundes, seit der Entdeckung des Augenspiegels durch H. v. Helmholtz stets das größte Interesse der Physiologen erregt. Es empfiehlt sich um so eher, diese Methode an die Spitze der Reihe der dioptrischen Methoden zu stellen, als

dieselbe wohl unter allen die segensreichste ist und die größte praktische Bedeutung hat.

Die Theorie des Augenleuchtens wurde von Helmholtz in seinem berühmten Satz II in folgenden Worten zusammengefaßt: „Wenn die Pupille des beobachteten Auges leuchtend erscheinen soll, so muß sich auf seiner Netzhaut das Bild der Lichtquelle ganz oder teilweise mit dem Bilde der Pupille des Beobachters decken.“ Obwohl hier unter Bild ein unscharfes, durch Zerstreuungskreise entstandenes Bild verstanden wird, ist dieser Satz dennoch nicht allgemeingültig, denn bei der Abbildung der Lichtquelle oder der Pupille des untersuchenden Auges in der Pupille des beobachteten Auges, wie es in gewissen ophthalmoskopischen Methoden vorkommt, kann nicht füglich von einem auf der Netzhaut befindlichen, wenn auch unscharfen Bilde gesprochen werden. Die auch diese Fälle umfassende Formulierung ergibt sich durch den oben eingeführten Begriff des Strahlenraumes eines optischen Systems. Damit der Augenhintergrund Licht aussenden könne, muß derselbe beleuchtet sein. Es liegt also immer ein Beleuchtungssystem vor, welches sich von der Lichtquelle zum Augenhintergrunde des untersuchten Auges erstreckt, und in welchem der Umriß der Lichtquelle als Blendenöffnung zu betrachten ist. Auf der anderen Seite erstreckt sich das eigentliche ophthalmoskopische System oder das Beobachtungssystem vom Augenhintergrunde des beobachteten Auges zur Eintrittspupille des Untersuchers. Die Bedingung des Augenleuchtens ist offenbar, daß ein Teil des Augenhintergrundes des beobachteten Auges auf einmal im Strahlenraume des Beleuchtungssystems und in demjenigen des Beobachtungssystems belegen ist.

Notwendige Bedingung der Ophthalmoskopie ist außerdem, daß im Beobachtungssystem ein optisches Bild des Augenhintergrundes des beobachteten Auges in einem Abstande entworfen wird, für welchen das beobachtende Auge eingestellt werden kann. Daß die Erfüllung dieser beiden Grundbedingungen bei gewissen Versuchsanordnungen auch hinreichend ist, um die Details des Augenhintergrundes beobachten zu können, wurde erst durch den Versuch entschieden. Bei gewissen Anforderungen, sei es an Schärfe und Vergrößerung des ophthalmoskopischen Bildes, sei es an Helligkeit und Feldgröße, genügen dieselben nicht, sondern muß noch dazu gefordert werden, daß das im untersuchten Auge durch regelmäßige oder diffuse Reflexion entstandene falsche Licht aus dem Beobachtungssystem weggeschafft wird. Die Methoden, bei welchen auch dieser Bedingung genügt wird, seien als die der reflexlosen, die übrigen als die der einfachen Ophthalmoskopie bezeichnet.

Zur einfachen Ophthalmoskopie im aufrechten Bild genügt, wenn sowohl das beobachtende wie das beobachtete Auge emmetropisch sind, als einfachstes Instrumentarium ein Objektträger und eine Stearinkerze. Die Lichtquelle wird seitlich vom beobachteten Auge aufgestellt und so weit nach hinten verschoben, bis die Regenbogenhaut desselben nicht mehr von direktem Lichte getroffen wird, der Untersucher hält die als Spiegel benutzte Glasplatte vertikal vor dem Auge und möglichst nahe demselben in solcher Stellung, daß das reflektierte Licht in die Pupille geworfen wird. Wenn er dann die Pupille seines gleichnamigen Auges auf die Linie bringt, welche

das Zentrum der Pupille des untersuchten Auges mit dem Mittelpunkte des virtuellen Spiegelbildes der Flamme verbindet, und sich dabei möglichst dem beobachteten Auge nähert, so sieht er bei erschlaffter Akkommodation die Details des Augenhintergrundes in einem kleinen, hinreichend hell erleuchteten Fleck, welchen er durch Änderung der Spiegelstellung und entsprechende Bewegungen seines Kopfes bzw. durch Änderung der Blickstellung des beobachteten Auges beliebig über den Augenhintergrund wandern lassen kann, wozu allerdings einige Übung erforderlich ist. Der wesentliche Nachteil dieser einfachsten Methode der Ophthalmoskopie mit durchsichtigem Spiegel ist das kleine Feld des Beleuchtungssystems, während die geringe Helligkeit desselben nicht so sehr in die Wagschale fällt. Bei der sparsamen Beleuchtung des Zimmers durch die schwache Lichtquelle erweitern sich nämlich die Pupillen sowohl des Untersuchers wie des Beobachteten, und die geringe in das Auge geworfene Lichtmenge verursacht nur eine geringe Kontraktion der Pupille des untersuchten Auges. Die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut desselben ist aber in den mittleren Teilen des erleuchteten Fleckes dem Quadrate des Durchmessers der Pupille proportional, da bei emmetropischer Einstellung die nützliche Austrittspupille gleich der vollen Austrittspupille ist, sobald die Lichtquelle keinen kleineren Durchmesser als die Eintrittspupille des Auges hat. Im Beobachtungssystem ist wiederum, wenn beide Augen emmetropisch eingestellt sind, in dem zwischen den beiden Augen belegenen Medium die kleinere unter den Eintrittspupillen der betreffenden Augen die Pupille des Systems, und die Raumwinkelgröße der nützlichen Austrittspupille in der Fovea des beobachtenden Auges ist dem Quadrate des Durchmessers derselben proportional, so daß, wenn die Pupille des untersuchenden Auges nicht kleiner ist als die des beobachteten, die Beleuchtungsstärke in der Fovea des Untersuchers der vierten Potenz des Durchmessers der Pupille des beobachteten Auges proportional ist. Außerdem ist der Hornhautreflex so schwach, daß der Zerstreuungskreis, welcher im untersuchenden Auge durch denselben verursacht wird, das Sehen nicht hindert, indem man sozusagen durch denselben hindurch die Details des Augenhintergrundes sehen kann. Die Folge hiervon ist, daß bei physiologischen Verhältnissen die Helligkeit im allgemeinen völlig ausreicht, solange man nicht zur Untersuchung der Fovea das Bild der Lichtquelle in das Zentrum derselben wirft, denn hierbei verengert sich die Pupille des beobachteten Auges gewöhnlich hinreichend, um die scheinbare Helligkeit des Augenhintergrundes im Vergleich mit der Helligkeit des Zerstreuungskreises des Hornhautspiegelbildes zu gering zu machen. Eine Vermehrung der spezifischen Helligkeit des virtuellen Spiegelbildes der Lichtquelle ist deshalb gewöhnlich ohne Nutzen, weil die Helligkeit des Hornhautspiegelbildes in demselben Verhältnis wächst. Das von Helmholtz zu diesem Zwecke empfohlene Mittel — größerer Einfallswinkel des Lichtes auf der spiegelnden Platte oder mehrere Platten — hat sich auch nicht praktisch bewährt. Bei größerem Einfallswinkel ist es nicht so leicht, die Regenbogenhaut des beobachteten Auges vor direktem Licht zu schützen, sondern es fällt teils Licht direkt in das untersuchte Auge, welches ungünstig auf die Pupillengröße wirkt, und teils stört die direkt beleuchtete Regenbogenhaut die Beobachtung, indem nicht dieselbe Helligkeit wie sonst zur Erkennung von Details im Augen-

hintergrunde genügt. Bei größerer Zahl der Platten gewinnt aber das von denselben diffus reflektierte Licht an Bedeutung, denn die sechs Glasflächen des Helmholtzschen Augenspiegels vollkommen rein und staubfrei zu halten, ist keine leichte Sache. Das Feld des Beleuchtungssystems wächst mit der Raumwinkelgröße der Lichtquelle in der Pupille des untersuchten Auges und wird also vergrößert, wenn man eine größere Lichtquelle anwendet und dieselbe dem Spiegel möglichst nähert. Es ist aber zu beachten, daß hierbei auch die Helligkeit des vom Hornhautspiegelbilde herrührenden Zerstreuungskreises im beobachtenden Auge wächst, so daß man nicht so leicht durch denselben hindurchsehen kann. Noch mehr ist dies der Fall, wenn nach dem Vorschlage von Helmholtz ein Bild der Lichtquelle mit einer Konvexlinse in die Pupille des beobachteten Auges entworfen wird.

Aus den angeführten Gründen wird allgemein dem undurchsichtigen, durchbohrten Spiegel auch für die direkte Ophthalmoskopie im aufrechten Bild der Vorzug gegeben. Da das Loch des Spiegels im Beleuchtungssystem als schattenwerfender Schirm, im Beobachtungssystem aber als Pupille oder Luke wirkt, so sind die Verhältnisse bei dieser Methode etwas komplizierter. Im Beobachtungssystem sind drei Öffnungen vorhanden: die Pupillen der beiden Augen und das Spiegelloch. Da aber einesteils die Pupille des beobachtenden Auges, in welche nur schwaches Licht eindringt, und welche durch Schließen des anderen Auges vergrößert wird, gewöhnlich hinreichend groß ist, um nicht als Pupille des Beobachtungssystems zu wirken, und da man anderenteils von der Lukenwirkung derselben deshalb absehen kann, weil bei der praktischen Ausführung der Untersuchung diese Lukenwirkung durch stetige Bewegungen des Spiegels, des Kopfes und des Auges kompensiert wird, so hat man praktisch nur mit dem Spiegelloche und mit der Pupille des beobachteten Auges als Öffnungen im Beobachtungssystem zu rechnen. Um dann nach den früher angegebenen Regeln das Feld des Beobachtungssystems zu berechnen, lasse man zunächst in der Fig. 9 S. 38 CD bzw. AB den Durchmesser der Projektion des Spiegelloches bzw. der Eintrittspupille des beobachteten Auges auf einer auf der Achse des Beobachtungssystems im Zentrum der betreffenden Öffnung senkrecht stehenden Ebene vorstellen. Das ganze Feld des Beobachtungssystems wird dann durch den Winkel AEB, das unvignettierte Feld durch den Winkel AFB angegeben. Werden diese Winkel mit v bzw. ω bezeichnet, und wird $CD = l$, $AB = p$ gesetzt, während d den Abstand der beiden Öffnungen voneinander darstellt, so erhält man, wenn vom Punkte C ein Lot auf AB gefällt wird, für die Tangenten der Winkel, welche dieses Lot mit den Linien BC bzw. AC bildet,

$$\operatorname{tg}\frac{v}{2} = \frac{p+l}{2d}, \qquad \operatorname{tg}\frac{\omega}{2} = \frac{p-l}{2d},$$

welche Ausdrücke aber in dieser Rechnung nur für so kleine Winkel gültig sind, daß dieselben an Stelle der Tangenten eingeführt werden können, somit auch die Form

$$v = \frac{p+l}{d}, \qquad \omega = \frac{p-l}{d}$$

annehmen. Da bei der mit den Gesetzen erster Ordnung erreichbaren Ge-

nauigkeit die Anwendung eines exakteren schematischen Auges als des reduzierten keinen Zweck haben würde, so ist AB nach der Brechung im dioptrischen System des Auges sein eigenes Bild, und es genügt, die den Punkten E und F konjugierten Punkte kennen zu lernen. Hierzu sei eine Lichtbewegung von F in der Richtung nach AB angenommen und seien e f die Abstände dieser Punkte von AB, wobei

$$-e = \frac{pd}{p+l} \qquad -f = \frac{pd}{p-l}$$

zu setzen ist. Die Brechkraft des optischen Systems des reduzierten Auges, dessen Hauptpunkte im Mittelpunkte von AB zusammenfallen, sei D, so daß durch die Gleichungen

$$\frac{1}{e'} = D + \frac{1}{e} \qquad \frac{1}{f'} = D + \frac{1}{f}$$

die reduzierten Abstände der den Punkten E bzw. F konjugierten Punkte erhalten werden. Da die von diesen Punkten zu den Endpunkten von AB gezogenen Linien das volle, bzw. das unvignettierte Feld aus der Netzhaut abschneiden, so ergeben, wenn dasselbe mit V bzw. Ω bezeichnet wird, und wenn b die reduzierte Länge des Auges darstellt, die Formeln

$$V = p\left(1 - \frac{b}{e'}\right) = p(1 - bD) + b \cdot \frac{p+l}{d}$$

$$\Omega = p\left(1 - \frac{b}{f'}\right) = p(1 - bD) + b \cdot \frac{p-l}{d}$$

die Feldgrößen im Beobachtungssystem. Diese Formeln können wie alle ähnlichen mit einer beliebigen Maßeinheit angewendet werden, wenn man sich nur daran erinnert, daß der reziproke Wert der Brechkraft mit derselben Einheit gemessen werden muß wie die übrigen Längenwerte, daß somit — wie früher auseinandergesetzt wurde — D nur dann eine Dioptrienzahl bedeutet, wenn der Meter die Einheit des Längenmaßes darstellt.

Da der Punkt F immer vor dem vorderen Brennpunkte oder hinter der Pupille das Auges liegt, der Punkt E aber auf beliebiger Seite des Brennpunktes belegen sein oder auch mit ihm zusammenfallen kann, so ist f' immer positiv, während e' einen unendlich großen oder einen endlichen positiven oder negativen Wert haben kann. Es geht deshalb zunächst aus den Formeln hervor, daß das unvignettierte Feld mit zunehmender Achsenlänge des Auges abnimmt, solange $f' > b$ ist. Daß aber dies immer der Fall sein muß, wird bei der Untersuchung des Beleuchtungssystems bewiesen werden. Weiter ersieht man, daß das volle Feld in allen Augen gleich der Pupillengröße ist, wenn der Punkt E im vorderen Brennpunkt des Auges liegt. Ist er dem Auge näher belegen, so ist das volle Feld größer, im entgegengesetzten Falle kleiner. Der Unterschied des Durchmessers desselben und des Pupillendurchmessers ist in beiden Fällen der Achsenlänge des Auges proportional. Wenn A die Refraktion des Auges darstellt, so ist

$$1 - bD = bA$$

und folglich

$$\frac{V}{b} = v + pA \qquad \frac{\Omega}{b} = \omega + pA$$

wo die linke Seite der Gleichungen den Ausdruck für die den Felddurchmessern entsprechenden Hauptpunktwinkel enthält, durch welche die Feldwinkelgrößen gemessen werden. Da nun diese Winkel, wie aus dem oben Gesagten erhellt, immer einen positiven Wert haben, obwohl bei hypermetropischer Refraktion $l > p$ sein kann, so nimmt die Feldwinkelgröße immer unter sonst gleichen Umständen mit zunehmender Refraktion des Auges zu und hat also bei Hypermetropie einen größeren Wert als bei Myopie. Der Wert v bzw. ω der Feldwinkelgröße im emmetropischen Auge kann zur Beurteilung der Methode verwendet werden und sei deshalb die charakteristische Feldwinkelgröße derselben genannt Dieselbe kann durch Anwenden der obenstehenden, die trigonometrischen Tangenten enthaltenden Formeln exakt angegeben werden. Im übrigen sind aber die Resultate dieser Untersuchung des ophthalmoskopischen Feldes nur als approximativ zu betrachten, da nur die Gesetze erster Ordnung angewendet worden sind. Dieselben sind auch unter der Voraussetzung hergeleitet, daß die Lukenwirkung der Pupille des beobachtenden Auges durch Verschiebungen des Kopfes kompensiert wird. Durch Kombination dieser Bewegungen mit Verschiebungen des Spiegels und entsprechenden Drehungen des eigenen Auges wird eine Verschiebung des Feldes auf dem Augenhintergrunde bewirkt, wodurch das der Untersuchung zugängliche Gebiet desselben wesentlich vergrößert wird. Da nun, damit diese Bewegungen den größten Effekt haben, die drei Öffnungen des Beobachtungssystems einander möglichst nahe liegen müssen, und da, wie aus den angegebenen Formeln hervorgeht, das Feld — sowohl das volle wie das unvignettierte — mit der Abnahme des Abstandes des Spiegels vom untersuchten Auge zunimmt, so ist es einleuchtend, daß ein guter Augenspiegel für die Untersuchung im aufrechten Bild eine solche Form haben muß, daß man bei der Untersuchung mit demselben dem beobachteten Auge so nahe kommen kann, bis Stirn an Stirn stößt. Aus derselben Ursache ist, wie schon hervorgehoben wurde, stets das gleichnamige Auge zur Ophthalmoskopie im aufrechten Bild zu gebrauchen.

Um bei beliebigem Refraktionszustande des beobachteten Auges ein Bild des Augenhintergrundes in einem Abstande zu entwerfen, wo es von einem beliebigen beobachtenden Auge scharf gesehen werden kann, muß eine große Auswahl von Linsen nach Bedarf bequem hinter das Spiegelloch geschoben werden können. Da der Spiegel bei der starken Annäherung an das beobachtete Auge schief auf der Achse des Beobachtungssystems stehen muß, eine Schiefstellung der Linsen aber wegen der hauptsächlich durch den begleitenden Astigmatismus resultierenden Bildverschlechterung vermieden werden soll, so hat man immer mit einem endlichen Abstande zwischen Spiegelloch und Linse zu rechnen, wobei der Durchmesser der Linsenöffnung hinreichend groß sein muß, um keine Lukenwirkung zu haben. Ist D_1 die Brechkraft der Linse, welche mit hinreichender Genauigkeit als unendlich dünn behandelt werden kann, und läßt man das optische Zentrum

derselben, den Punkt M (S. 47 ff.), in bezug auf beide Augen darstellen, wobei die Konstanten des beobachtenden Auges auf dieselbe Weise wie früher bezeichnet werden, die des beobachteten aber die analogen Bezeichnungen $D' A' m' \ldots .$ erhalten, so ist A'_m bzw. A_m die im optischen Zentrum der Linse gemessene Refraktion des beobachteten, bzw. des beobachtenden Auges und die Brechkraft der Linse gleich der Summe dieser Refraktionswerte. Mit hinreichender Genauigkeit kann nun angenommen werden, daß der vordere Brennpunkt des beobachtenden Auges mit dem optischen Zentrum der Linse zusammenfällt, wobei $A_m = L$ wird, so daß allgemein die Brechkraft der Linse des Beobachtungssystems gleich der Summe $A'_m + L$ gesetzt werden kann.

Zur Untersuchung der Vergrößerung bei der Ophthalmoskopie im aufrechten Bild hat man in die allgemeingültige Gleichung

$$-\frac{\omega_m}{\alpha_0} = D_0 (1 + \Delta_m A_m)$$

wo D_0 die Brechkraft des aus dem optischen System des beobachteten Auges und der Linse zusammengesetzten optischen Systems, Δ_m den Abstand des Punktes M vom vorderen Brennpunkte desselben darstellt, die Werte

$$D_0 = D' (1 - m'_0 D_1) \qquad \Delta_m = \frac{m' D'}{D_0} - \frac{1}{D_0} = \frac{m'_0 D'}{D_0}$$

einzuführen, und erhält

$$-\frac{\omega_m}{\alpha_0} = D_0 + m'_0 D' A_m = D' (1 - m'_0 A'_m)$$

welcher Wert, da der Winkel ω_m bei emmetropischer Einstellung des beobachtenden Auges gleich dem Hauptpunktwinkel ist, die absolute Vergrößerung angibt und in Übereinstimmung hiermit bei solcher Einstellung auch mit dem Werte D_0 zusammenfällt. Die Vergrößerung ist demnach, da m'_0 immer einen positiven Wert hat, bei Myopie des beobachteten Auges größer als bei Hypermetropie und nimmt überhaupt bei zunehmender Refraktion desselben ab. Schätzt man die Brechkraft des optischen Systems des Auges auf rund 60 dptr und m'_0 auf rund 1 cm, so ist in der konventionellen Sprache die Vergrößerung bei Emmetropie eine 15fache und bei Myopie bzw. Hypermetropie um N % größer bzw. kleiner, wenn N den numerischen Wert von A'_m darstellt. In den praktisch vorkommenden Fällen variiert somit die Vergrößerungszahl zwischen 13 und 18.

Unter der oben gemachten Voraussetzung, daß das optische Zentrum der Linse mit dem vorderen Brennpunkte des beobachtenden Auges zusammenfällt, stellt ω_m den Fokalpunktwinkel dar. Es folgt hieraus, daß die Netzhautbildgröße im beobachtenden Auge bei entspannter Akkommodation von der Achsenlänge desselben unabhängig ist, und daß allgemein

$$-\frac{D'}{D} (1 - m'_0 A'_m)$$

den Vergrößerungskoeffizienten bei der Abbildung der Netzhaut des beobachteten Auges auf der des beobachtenden darstellt.

Unter Berücksichtigung, daß

$$\omega'_f = \alpha_0 D' \qquad \frac{\omega'_m}{\omega'_f} = 1 - m'_0 A'_m$$

ist, kann man dem allgemeinen Ausdruck für die Vergrößerung die Form

$$\omega_m = -\omega'_m$$

geben, wo das negative Vorzeichen davon herrührt, daß die beiden Augen gegeneinander gekehrt sind und in den die Winkel ω definierenden Gleichungen kein Vorzeichenwechsel stattfinden soll.

Durch Einführung des Hauptpunktwinkels erhält man die beiden Ausdrücke für die individuelle Vergrößerung

$$-\frac{\omega_h}{\alpha_0} = D'(1 - m'_0 A'_m)(1 + m A) = B' \cdot \frac{1 + m A}{1 + m' A'}$$

von welchen letzterer den Einfluß der Akkommodation der beiden Augen und die Einwirkung eines etwa vorhandenen Astigmatismus im beobachteten Auge auf einfachste Weise angibt. Man ersieht, daß die Vergrößerung durch die Akkommodation des beobachtenden Auges verkleinert, durch die des beobachteten vermehrt wird, obwohl in beiden Fällen die die Akkommodation kompensierende Veränderung der Brechkraft der Linse des Beobachtungssystems in gleicher Richtung geht. Bei der Untersuchung des Augenhintergrundes eines astigmatischen Auges wird wiederum die Brechkraft der Linse so gewählt, daß man durch Anwendung der Akkommodation die abbildbaren Linien der beiden Systeme nacheinander scharf sehen kann. Es hat deshalb nicht nur A' sondern auch A einen verschiedenen Wert für die beiden Hauptschnitte, indem der Bedingung $A'_m + A_m = \text{Const.}$ durch die Akkommodation des beobachtenden Auges genügt wird. Durch Einführung dieser Bedingung ergibt sich, wenn der Vergrößerungskoeffizient $-\frac{\omega_h}{\omega'_h}$ mit K_1 bzw. K_2 bezeichnet wird, je nachdem A' den Wert A'_1 bzw. A'_2 hat, für die durch den Astigmatismus bedingte Verzerrung, welche am einfachsten durch das Verhältnis $\frac{K_1}{K_2}$ gemessen wird, ein ziemlich komplizierter Ausdruck, in welchem die Verzerrung nicht nur vom Astigmatismus, sondern auch vom Refraktionszustande der beiden Augen abhängig ist. Da nun aber in den praktisch vorkommenden Fällen die Zahlengrößen vom Typus mA genügend klein im Verhältnis zur Einheit sind, um in Fällen, wo nur die Abbildungsgesetze erster Ordnung zur Verwendung kommen, die Weglassung der höheren Potenzen derselben zu rechtfertigen, so ist jedenfalls die auf diese Weise erhaltene Approximativformel der astigmatischen Verzerrung

$$\frac{K_1}{K_2} = 1 - (m' + m)(A'_1 - A'_2)$$

für praktische Zwecke hinreichend genau. Da einer stärkeren Brechkraft des optischen Systems des Auges ein geringerer Refraktionswert entspricht, so ist die Vergrößerung in dem stärker brechenden Hauptschnitte größer. Sollte der Beobachter nicht über die erforderliche Akkommodation verfügen, so tritt an Stelle der einen, oder wenn er eine Mitteleinstellung wählt, an Stelle beider Abbildungen die optische Projektion, wobei an Stelle des ersten Hauptpunktes des beobachtenden Auges das dem zwischen demselben und der Linse belegenen Medium zugehörige Bild des Projektionszentrums treten muß. Man hat also für m den Abstand dieses Punktes vom optischen Zentrum der angewendeten Linse und für A die betreffende in demselben Punkte gemessene Konvergenz des Objektstrahlenbündels einzuführen. Die Deduktion bleibt dieselbe und resultiert in dieselbe Formel, so daß man nur in der oben angegebenen Approximativformel m durch den angegebenen Wert zu ersetzen hat. Hierzu ist aber zu bemerken, daß durch die eingeführte Approximation der Unterschied zwischen dem Abstande des Projektionszentrums und demjenigen seines Bildes vom optischen Zentrum der Linse im Produkte mit der Refraktion vernachlässigt wird. Bei der gewöhnlich vorkommenden Größe des Spiegelloches wirkt dasselbe als Projektionszentrum und man hat also für m den Abstand desselben von der Linse mit negativem Werte einzuführen, wobei $m' + m = d$ wird. Es resultiert eine geringere Verzerrung als bei der gewöhnlichen Untersuchung.

Die so ermittelte astigmatische Verzerrung gilt nur für die Detailvergrößerung, bei welcher die Bewegung des beobachtenden Auges keine Rolle spielt. Gewöhnlich wird aber die Verzerrung nach der scheinbaren Form der Papille beurteilt, wozu das Sehen mit bewegtem Auge erforderlich ist. Man hat dann den Drehpunkt des Auges als Projektionszentrum zu benutzen und muß demnach in der Approximativformel die Größe $m' + m$ um rund 1 cm vermehren, um einen Ausdruck für die scheinbare Verzerrung zu erhalten.

Die Lichtstärke des Beobachtungssystems wird von der Raumwinkelgröße der Austrittspupille desselben gemessen, indem die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut des beobachtenden Auges gleich dem Produkte derselben mit der spezifischen Lichtstärke der beleuchteten Netzhaut des beobachteten Auges ist. Konstruiert man das vom optischen System des beobachteten Auges entworfene Bild des Spiegelloches und zieht man von den Endpunkten eines Durchmessers des Bildes je eine Linie zu den heterologen Endpunkten des parallelen Durchmessers der Pupille, so schneiden sich diese Linien in dem oben S. 59 durch f' bestimmten Punkte. Da nun $f' > b$ ist, so liegt dieser Punkt hinter der Netzhaut, woraus folgt, daß das Bild des Spiegelloches auf der Netzhaut eine geringere Raumwinkelgröße als die Pupille hat. Da weiter bei der Ophthalmoskopie die Netzhaut des beobachtenden Auges auf der des beobachteten abgebildet wird, so stellt das Bild des Spiegelloches die Eintrittspupille dar.

Unter Zugrundelegung des reduzierten Auges, was für diese Untersuchung jedenfalls hinreichend genau ist, erhält man für die Raumwinkelgröße der Austrittspupille den Wert

$$\frac{\pi p_n^2 B^2}{4 n^2},$$

wenn n den Brechungsindex des Glaskörpers und p_n den Durchmesser der nützlichen Augenpupille darstellt. Man erhält letzteren, wenn man mit dem Punkte, für welchen das beobachtende Auge eingestellt ist, als Projektionszentrum das von der Linse des Beobachtungssystems entworfene Bild des Spiegelloches in die Pupille projiziert, was durch die Gleichung

$$p_n : \frac{1}{A} = \frac{1}{1-(m'-d)D_1} : \left(\frac{1}{A_m} + \frac{m'-d}{1-(m'-d)D_1}\right) = 1 : \frac{1-(m'-d)A'_m}{A_m}$$

ausgedrückt wird. Es ergibt sich

$$p_n = 1 \cdot \frac{1-m A_m}{1-(m'-d)A'_m}$$

woraus hervorgeht, daß die nützliche Augenpupille bei Hypermetropie des beobachteten Auges und bei Myopie des beobachtenden am größten ist. Unter Beachtung der Beziehung

$$B = D \cdot \frac{1-m_0 A_m}{1-m A_m}$$

kann dem Ausdrueke für die Raumwinkelgröße der Austrittspupille die Form

$$\frac{\pi l^2 D^2}{4 n^2}\left(\frac{1-m_0 A_m}{1-(m'-d)A'_m}\right)^2$$

gegeben werden, woraus hervorgeht, daß die Beleuchtungsstärke auf der Netzhaut des beobachtenden Auges, wenn das optische Zentrum der Linse im vorderen Brennpunkte desselben belegen ist, nur von der Refraktion des beobachteten Auges abhängig ist.

Im Beleuchtungssystem sei zunächst ohne Rücksichtnahme auf die Lichtquelle der gegenseitige Einfluß des Spiegelloches und der Pupille des beobachteten Auges gewürdigt. Wie früher bewiesen wurde, erstreckt sich in dem hinter dem optischen System des beobachteten Auges belegenen Medium der durch das Spiegelloch verursachte Vollschatten zwischen den den Punkten F und E Fig. 9 S. 38 konjugierten Punkten. Ersterer Punkt muß deshalb mit Notwendigkeit hinter der Netzhaut belegen sein, wenn der zentrale Teil des Feldes erleuchtet sein soll. Dies ist nun zwar nicht unbedingt erforderlich, indem man nötigenfalls auf die Zentrierung des Beobachtungssystems verzichtet. Da nämlich der durch den Vollschatten verursachte dunkle Fleck auf dem Augenhintergrund stets auf der Achse des Beobachtungssystems zentriert ist, so wirkt derselbe in hohem Grade störend. Es ist also zwar nicht zur Ausführung der Ophthalmoskopie überhaupt, wohl aber zur Ophthalmoskopie mit zentriertem Beobachtungssystem notwendig, die oben formulierte Bedingung $f' > b$ zu erfüllen. Da dieselbe damit gleichbedeutend ist, daß das Spiegelloch die Pupille des Beobachtungssystems darstellt, so gibt sie auch die größte zulässige Weite des Spiegelloches bei zentriertem Beobachtungssystem an. Um einen praktisch anwendbaren Ausdruck zu erhalten, hat man nur das Loch in die Pupille zu projizieren, indem der Punkt, für welchen das Auge eingestellt ist, das

Projektionszentrum darstellt. Man findet auf diese Weise für die Bedingung der Loehgröße die Form

$$l < p(1 + d A)$$

Wird dieser Bedingung nieht genügt, so muß man, wie gesagt, auf die Zentrierung des Beobaehtungssystems verzichten. Dies gesehieht, indem der Spiegel so weit dezentriert wird, bis derselbe nieht mehr als ein durehlochter Spiegel wirkt, sondern nur das auf der einen Seite des Loches reflektierte Lieht in das Auge hineinlangt. Diese Anwendungsart des durehloehten Spiegels gehört deshalb in das Gebiet der Ophthalmoskopie mit undurchbohrtem Spiegel und soll bei der Behandlung desselben gewürdigt werden.

Bei erfüllter Bedingung der Loehgröße ergeben sieh für die Ausdehnung des dureh Pupille und Spiegelloeh unvignettierten Feldes auf dieselbe Weise wie im Beobaehtungssystem dieselben Werte ω bzw. Ω, und das außerhalb der hierdureh bestimmten Grenzen befindliche Feld ist, soweit keine Vignettierung dureh die Lage und Größe der Liehtquelle stattfindet, in umgekehrter Riehtung, d. h. mit peripheriewärts zunehmender Liehtdiehte vignettiert.

Eine andere Vignettierung als diese braueht auch nieht im Beleuehtungssystem vorzukommen. Man kann nämlieh das Bild einer Liehtquelle von hinreiehender Ausdehnung auf den Augenhintergrund selbst entwerfen, wobei eine Lukenwirkung derselben ausgeschlossen ist. Da hierbei die im Beleuehtungssystem bzw. im Beobaehtungssystem vorhandene Vignettierung in einander entgegengesetzter Riehtung wirkt, so ist die Helligkeit des ophthalmoskopisehen Bildes sehr gleiehmäßig, wenn dies mit der spezifisehen Helligkeit der Liehtquelle der Fall ist. Leider hat aber diese Methode wegen der sehweren Beschaffung solcher Lichtquellen von hinreichender Größe den Naehteil eines kleinen Feldes im Beleuchtungssystem. Theoretisch könnte ein größeres Feld ohne sonstige Vignettierung erreicht werden, indem man die Lichtquelle in der Pupille oder in deren nächster Nähe abbildete Praktiseh gewinnt man aber nichts damit bei der einfachen Ophthalmoskopie, indem der stark vergrößerte Hornhautreflex, von der Komplikation des Instrumentariums abgesehen, die Untersuchung vereitelt. Um das Feld zu vergrößern, hat man also praktiseh keine andere Wahl, als die Liehtquelle an einem anderen Ort abzubilden, wobei eine weitere Vignettierung mit in Kauf genommen werden muß. Eine vollständige Untersuehung derselben würde hier zu weit führen, denn da der Umriß der Lichtquelle als eine Blende zu behandeln ist, so hat man mit zwei Öffnungen und einem Zentralschirm zu reehnen, wobei die allgemeingültigen Formeln etwas kompliziert werden. Es soll deshalb hier nur die Untersuchung der praktisch wichtigen Fragen durehgeführt werden. Der Durchmesser des vom Spiegel entworfenen Bildes der Liehtquelle sei hierbei mit q, der Abstand desselben vom Spiegel mit e bezeichnet, wobei letzterer einen positiven Wert hat, wenn der Spiegel zwisehen der Pupille und dem Lichtquellenbilde belegen ist. Was dann zunächst die gegenseitige Einwirkung des Spiegelloches und des Liehtquellenbildes betrifft, so muß wiederum zunächst gefordert werden, daß kein Vollsehatten auf den Augenhintergrund fällt. Die Bedingung hierfür ist, daß

die Winkelgröße des Lichtquellenbildes in dem Einstellungspunkte des Auges die des Spiegelloches übersteigt. Wenn allgemein das Zeichen |K| den numerischen Wert einer beliebigen Größe K darstellt, so hat man folglich:

$$q:\left|\frac{1}{A}+c+d\right|>1:\left|\frac{1}{A}+d\right|$$

d. h.

$$q>1\cdot\left|\frac{1+(c+d)A}{1+dA}\right|$$

wo aber dA im Verhältnis zur Einheit hinreichend klein ist, um eine Serienentwicklung zu gestatten und die höheren Potenzen wegzulassen. Die so erhaltene Approximativformel

$$q>1\cdot|1+cA|$$

gibt somit hinreichend genau die Bedingung des Lichtquellenbildes an. Ist dieselbe nicht erfüllt, so entsteht wiederum ein dunkler Fleck im Zentrum des ophthalmoskopischen Feldes, welcher sich aber von dem oben beschriebenen dadurch unterscheidet, daß er sich bei Drehungen des Spiegels um eine durch das Zentrum des Loches gehende Achse ohne Dezentration des Beobachtungssystems auf dem Felde des letzteren verschiebt und dementsprechend nicht in demselben Grade störend wirkt wie jener Fleck. Da er aber immerhin zu Verwechselungen Anlaß geben kann, soll die Bedingung am besten erfüllt werden.

Die charakteristische Feldwinkelgröße des durch die gegenseitige Einwirkung von Spiegelloch und Lichtquelle unvignettierten Feldes ergibt sich nach oben angewendeter Methode und ist $\frac{q-1}{c}$. Je nachdem der numerische Wert dieser Größe den Wert ω übersteigt oder nicht, wird somit im emmetropischen Auge die Grenze des zentralen unvignettierten Feldes durch letzteren Winkel oder durch ersteren angegeben.

Die volle Feldwinkelgröße des Beleuchtungssystems erhält man auf dieselbe Weise wie die des Beobachtungssystems. Wenn die charakteristische Feldwinkelgröße mit w, die lineare Feldgröße auf der Netzhaut mit W bezeichnet wird, so ist

$$w=\frac{p+q}{c+d} \qquad BW=w+pA$$

Die äußere Grenze des durch die gegenseitige Einwirkung von Lichtquelle und Pupille unvignettierten Feldes, für welches die analogen Bezeichnungen λ Λ angewendet werden mögen, wird durch die analogen Ausdrücke

$$\lambda=\frac{p-q}{c+d} \qquad B\Lambda=\lambda+pA$$

bestimmt.

Die Lichtstärke des Beleuchtungssystems wird durch den Flächeninhalt P_n der nützlichen Pupille angegeben, indem die Beleuchtungsstärke

auf der Netzhaut, wenn e die spezifische Helligkeit der Lichtquelle bezeichnet, durch den Ausdruck

$$e\, P_n\, B^2$$

erhalten wird. Um die nützliche Pupille zu finden, hat man mit dem Einstellungspunkte des Auges als Projektionszentrum das Lichtquellenbild und das Spiegelloch in die Pupille zu projizieren. Je nachdem die Projektion des Lichtquellenbildes größer oder kleiner als die Pupille ist, hat man von der Flächengröße der letzteren oder von der der ersteren die Flächengröße der Projektion des Spiegelloches abzuziehen. Von den beiden Werten

$$P'_n = \frac{\pi}{4}\left(p^2 - \frac{l^2}{(1 + d\,A)^2}\right) \qquad P''_n = \frac{\pi}{4}\left(\frac{q^2}{(1 + [c + d]\,A)^2} - \frac{l^2}{(1 + d\,A)^2}\right)$$

ist also der kleinere mit P_n identisch.

Durch optische Hilfsmittel kann der Ort und die Größe des vom Spiegel erzeugten Lichtquellenbildes beliebig beeinflußt werden. Da aber die praktische Ausführung der einfachen Ophthalmoskopie vor allem eine unbehinderte Beweglichkeit des Spiegels erfordert, so sind von vornherein alle Kombinationen desselben mit Linsen auszuschließen, welche — ganz abgesehen von der Raumbeschränkung — kompliziertere Manipulationen bei der Änderung der Richtung des Lichteinfalles erfordern. Nur wenn die Lichtquelle selbst unbeweglich mit dem Spiegel verbunden ist, wie in gewissen elektrischen Augenspiegeln, können solche Kombinationen praktisch anwendbar sein. Im allgemeinen hat man also zur Beeinflussung des Lichtquellenbildes nur ein optisches Mittel zur Verfügung, nämlich die Form des Spiegels Wenn es sich darum handelt, das größte mögliche Feld mit der besten möglichen Helligkeit zu erhalten, so hat man ersichtlicherweise die Lichtquelle dem Spiegel möglichst zu nähern. Da nun der Quotient $\frac{q}{c} = K'$ nur von der Größe und dem Abstande der Lichtquelle, nicht aber von der Form des Spiegels abhängig ist, indem sowohl für die tangentiale wie für die sagittale Abbildung die Hauptpunkte auf der Spiegelfläche zusammenfallen, so hat man von dem erreichbaren Werte von K′ auszugehen und die Veränderung des Feldes und der Lichtstärke bei der Veränderung von c zu untersuchen. Hierzu gibt eine Differentiation das einfachste einwandfreie Mittel ab. Die Untersuchung soll aber auch ohne dieselbe mit Hilfe der Fig. 9 illustriert werden. Indem K′ als Konstante behandelt, mithin $q\,d\,c = c\,d\,q$ gesetzt wird, erhält man durch Differentiation

$$\frac{d\,w}{d\,c} = \frac{K'\,d - p}{(c + d)^2} \qquad \frac{d\,\lambda}{d\,c} = -\frac{K'\,d + p}{(c + d)^2}$$

wo K′ bei negativem Werte von c auch einen negativen Wert hat, weil q immer mit positivem Vorzeichen benutzt wird. Was zunächst die volle Feldgröße betrifft, so hat w stets dasselbe Vorzeichen wie c, da eine Belegenheit des Lichtquellenbildes zwischen Spiegel und Pupille wegen der Überhandnahme des von der Hornhaut reflektierten Lichtes ausgeschlossen ist. Die

Variation der numerischen Werte von w und c geht dann bei positivem bzw. negativem Werte des Differentialquotienten in gleicher bzw. entgegengesetzter Richtung. Nun hat aber der Differentialquotient bei negativem Werte von c und folglich auch von K′ einen negativen, bei positivem Werte dieser Größen einen positiven oder negativen Wert, je nachdem dies mit der Größe K′ d — p der Fall ist. Da |K′| bzw. $\frac{p}{d}$ die Winkelgröße der Lichtquelle bzw. der Pupille im Zentrum des Spiegelloches darstellt, so folgt hieraus, daß, wenn man, von einer stark konkaven Form des Spiegels ausgehend, die Krümmung desselben zunächst immer flacher, dann gleich Null und schließlich immer konvexer macht, das volle Beleuchtungsfeld, wenn die Winkelgröße der Lichtquelle im Zentrum des Spiegelloches größer als die der Pupille ist, stetig abnimmt, während, wenn letztere Winkelgröße erstere übersteigt, das Feld bei unendlich großem Werte von c ein Minimum erreicht und bei virtuellem Lichtquellenbilde mit dessen Annäherung an den Spiegel wieder an Größe zunimmt. Was das von Lichtquelle und Pupille unvignettierte Feld betrifft, so haben nur die Fälle, wo q — p positiv ist und A dasselbe Vorzeichen wie λ hat, praktische Bedeutung. In diesen Fällen ist das Vorzeichen von λ dem von c entgegengesetzt, so daß bei positivem bzw. negativem Werte des Differentialquotienten die Variation der numerischen Werte von λ und c in entgegengesetzter bzw. gleicher Richtung geht. Bei positivem Werte von c ist der Differentialquotient negativ, bei negativem Werte dieser Größe hat er das entgegengesetzte Vorzeichen gegen K′ d + p. Es folgt hieraus, daß, wenn die Winkelgröße der Lichtquelle im Zentrum des Spiegelloches die der Pupille übersteigt, das von Lichtquelle und Pupille unvignettierte Feld bei der oben angegebenen Variation der Spiegelform stetig abnimmt, während im entgegengesetzten Falle im Gebiete $q > p$ $\lambda A > 0$ das Feld bei reellem Lichtquellenbilde zunimmt, bei unendlichem Werte von c ein Maximum erreicht und dann bei virtuellem Lichtquellenbilde abnimmt. Sowohl bei reellem wie bei virtuellem Lichtquellenbilde erreicht man, wenn dieses Bild dem Spiegel genähert wird, einen Punkt, wo das ganze Feld durch die gegenseitige Einwirkung von Lichtquelle und Pupille vignettiert ist. Setzt man nämlich $A = 0$, so erhält man

$$c = \frac{p(1 + dA)}{K' - pA}$$

wo bei negativem Werte von c auch K′ negativ zu setzen ist. Bei Emmetropie fallen diese Punkte mit den Punkten zusammen, wo das Lichtquellenbild durch Annäherung an den Spiegel bis zur Größe der Pupille verkleinert worden ist, während bei hochgradiger Ametropie, wie aus der Formel hervorgeht, bedeutende Abweichungen von diesem Verhalten stattfinden.

Die Einwirkung der Spiegelform auf das Beleuchtungsfeld kann, wie schon hervorgehoben wurde, mit Hilfe der Fig. 9 illustriert werden. Läßt man nämlich z. B. AB ein reelles Bild der Lichtquelle, CD die Pupille vorstellen und die Lichtbewegung von rechts nach links stattfinden, wobei der Punkt I das Zentrum des Spiegelloches darstellen mag, so kann durch Änderung der Spiegelform AB weiter nach links verschoben werden, der

Winkel AIB bleibt aber unverändert. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß dabei der Winkel AEB $= w$ abnimmt, der Winkel AFB $= \lambda$ zunimmt, während, wenn der Punkt F auf der anderen Seite von I belegen wäre, auch λ bei der Entfernung des Lichtquellenbildes vom Spiegel abnehmen müßte. Im letzteren Falle wäre $-K' > \frac{p}{d}$, während in der Figur das umgekehrte Verhalten stattfindet. Hierdurch sind die Resultate bei reellem Lichtquellenbilde illustriert. Auf ganz ähnliche Weise kann dies bei virtuellem Lichtquellenbilde geschehen, wenn I zwischen AB und CD verlegt wird.

Die Resultate können dahin zusammengefaßt werden, daß bei $|K'| > \frac{p}{d}$ ein reelles Lichtquellenbild in jeder Beziehung günstiger für die Feldgröße ist als ein unendlich entferntes, dieses wiederum günstiger als ein virtuelles, bei $|K'| < \frac{p}{d}$ dagegen sowohl ein reelles wie ein virtuelles Lichtquellenbild günstiger für die gesamte Feldgröße, ungünstiger für die Größe des durch Pupille und Lichtquelle unvignettierten Feldes ist als ein unendlich entferntes. Da nun die technischen Schwierigkeiten bei der praktischen Ausführung der einfachen Ophthalmoskopie im aufrechten Bild mit abnehmender Pupillengröße wachsen, und da die Realisierung der Bedingung $|K'| > \frac{p}{d}$ bei kleiner Pupille auf keine Schwierigkeiten stößt, so ist im allgemeinen dem Konkavspiegel der Vorzug zu geben, wenn die Feldgröße des Beleuchtungssystems ins Auge gefaßt wird. Wenn man aber die Krümmung des Spiegels zu sehr steigert, so wird er wieder weniger praktisch, indem der Hornhautreflex störender einwirkt. Dasselbe gilt von dem diffus in Hornhaut und Linse reflektierten Licht, auf dessen Bedeutung weiter unten zurückzukommen ist. Da ein um so größerer Teil des durch die Größe der Lichtquelle und des Spiegels bestimmten Lichtstromes in das Auge eindringt, einen je größeren Teil die Pupille von dem vom Spiegel ausgehenden Lichtstrome abschneidet, so wächst die in das Auge eindringende Lichtmenge mit zunehmender Krümmung des Konkavspiegels, wobei sich die Pupille verengert, um so mehr da beim größeren Feld die Maculagegend mehr der Beleuchtung ausgesetzt wird. Da nun die gesamte auf die Netzhaut fallende Lichtmenge durch die Pupille geht, so wird die Proportion der Beleuchtungsstärke auf dem Augenhintergrund zu der Lichtdichte in Hornhaut und Linse bei zunehmender Krümmung des Spiegels immer ungünstiger, das von diesen Medien diffus reflektierte Licht deshalb auch immer störender. Die Folge hiervon ist, daß man für den allgemeinen Gebrauch keinen kürzeren Spiegelradius als ungefähr 15 cm anwenden soll. Diese Grenze ist natürlich nur eine Erfahrungstatsache, welche mit der Pupillengröße in Übereinstimmung steht. Wo nur dilatierte Pupillen vorkommen — wie es ja in physiologischen Instituten bei ophthalmoskopischen Versuchen realisiert werden kann —, dort wird ein stärker gekrümmter Augenspiegel ohne Nachteil angewendet werden können. Beim praktischen Gebrauch findet man aber diese Krümmung eher zu scharf. Zu bemerken ist übrigens, daß wegen des bei der Spiegelung des Lichtes unter schiefer Inzidenz entstehenden Astigmatismus die Feld-

größe in tangentialer und in sagittaler Richtung gesondert berechnet werden muß.

Bei der Untersuchung mit einem solchen Spiegel erhält man allgemein mit den gewöhnlichen Lichtquellen ein genügend helles und für die Aufsuchung pathologischer Veränderungen hinreichend großes Feld, sobald man nicht die Maculagegend untersuchen will. Der Hornhautreflex, an dem man sonst ohne Schwierigkeit vorbeisehen kann, stört nämlich hier wesentlich mehr, indem er mehr zentral liegt, und weil sich überdies die Pupille wegen der stärkeren Beleuchtung des Netzhautzentrums mehr verengert. Die Untersuchung dieser Gegend ohne künstliche Pupillendilatation ist deshalb in vielen Fällen mit diesem Spiegel unmöglich. Manchmal kommt man dabei zum Ziel, wenn man auf das große Feld verzichtet und einen Planspiegel mit kleiner Lichtquelle anwendet.

Die Beleuchtungsstärke im zentralen Teile des Feldes ist, wie aus der oben gegebenen Formel hervorgeht, unabhängig von der Spiegelform, solange nicht das Lichtquellenbild so klein ist, daß $P''_n < P'_n$ wird. Ist dies der Fall, so hat aber dieselbe bei emmetropischem Auge genau den gleichen Wert, wenn ein Konvex- oder ein Konkavspiegel mit demselben Radius angewendet wird. Die geläufige Bezeichnung des erstgenannten Spiegels als lichtschwach ist deshalb nur mit Hinsicht auf die Menge des in das Auge eindringenden Lichtes gerechtfertigt.

Die Größe des Spiegels soll so bemessen werden, daß das Feld des Beleuchtungssystems durch alleinige Drehung des Spiegels um eine durch das Loch gehende Achse bis zur äußersten Grenze des Feldes des Beobachtungssystems gebracht werden kann, ohne daß der Lichtstrom durch den Spiegel abgeschnitten wird. Bei emmetropischem Auge ist hierzu ein Pupillendurchmesser Spiegelfläche oberhalb und unterhalb des Loches, etwas mehr in temporaler, etwas weniger in nasaler Richtung erforderlich. Bei rundem Spiegel ist deshalb ein Durchmesser von 20 mm vollkommen ausreichend und sollte nie überschritten werden. Eher wäre ein kleinerer vorzuziehen, da mit einem solchen weniger überflüssiges Licht auf die Iris geworfen wird. Die Lochgröße soll mit Hinsicht auf die oben deduzierte Bedingung so klein gemacht werden, wie es mit Hinsicht auf die praktische Anwendbarkeit des Spiegels möglich ist, und auf jeden Fall nicht 2 mm im Durchmesser übersteigen. Hauptforderung ist, daß der schädliche Raum zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungssystem möglichst reduziert wird. Zu diesem Zwecke muß ein durchlochter Glasspiegel möglichst dünn und die Bohrung zylindrisch sein. Die größten Anforderungen müssen an die matte Schwärzung der Innenseite der Bohrung gestellt werden. Auch in den besten Augenspiegeln entsteht hier ein Reflexbildchen der Lichtquelle, dessen Zerstreuungskreis das ophthalmoskopische Bild etwas verschleiert, bei schlechter Schwärzung kann aber die Lichtstärke des Zerstreuungskreises hinreichend werden, um die Ophthalmoskopie bei enger Pupille zu vereiteln. Man hat diesen Nachteil zu vermeiden gesucht, indem man die Durchbohrung durch ein Loch in der Belegung des Spiegels ersetzt hat, und in der Tat wird der schädliche Raum auf diese Weise zu seinem Minimum reduziert. Ein solcher Spiegel muß aber auf beiden Seiten peinlichst rein gehalten werden, was teils für die praktische Anwendung zu zeitraubend ist, teils, was die Rück-

seite betrifft, auf technische Schwierigkeiten stößt. In jüngster Zeit hat nun Priestley-Smith[1]) auf die Rückseite ein anderes Glas kitten lassen, wodurch die Reinigung desselben erleichtert wird. Praktische Erfahrungen über die Anwendbarkeit solcher Spiegel im aufrechten Bild liegen noch nicht vor.

Die einfache Ophthalmoskopie mit undurchlochtem belegtem Spiegel hat als selbständige Methode keinen Wert. Da nämlich der Spiegel einseitig stehen muß, so wirkt die Kante desselben, an der man vorbeisieht, und der sichtbare Teil des Pupillenrandes als Luken, wodurch eine einseitige Vignettierung entsteht, und hierzu kommt außerdem, daß man immer exzentrisch durch die Pupille sehen muß, wo die Strahlenvereinigung schlechter ist als im Zentrum. Dagegen wird diese Methode täglich in den Fällen angewendet, wo bei der gewöhnlichen Untersuchung die Pupille sich so verengt, daß die Bedingung der Lochgröße nicht erfüllt ist. Man muß dann, wie schon oben bemerkt wurde, den Spiegel dezentrieren und benutzt somit den durchlochten Spiegel, als wäre er nicht durchlocht, hat aber dabei den Vorteil, daß man die Spiegelkante in einer beliebigen Richtung von der Gesichtslinie bequem anbringen kann. Besonders oft kommt diese Methode bei der Untersuchung der Maculagegend bei enger Pupille zur Anwendung. Daß man sie anwendet, erkennt man, da die dazu nötigen Bewegungen des Spiegels automatisch erfolgen, daran, daß man die Maculagegend wohl in einem exzentrischen, nicht aber im zentralen Teile des Zerstreuungskreises des Spiegelloches sehen kann.

Die einfache Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild. Wird mit einer Konvexlinse ein Bild der Pupille des Beobachters in der des beobachteten Auges entworfen, so liegt ein umgekehrtes Bild des Augenhintergrundes dieses Auges zwischen der Linse und dem Auge des Beobachters, und wenn der Augenhintergrund erleuchtet ist, kann dieser das Bild unter Anwendung seiner Akkommodation oder einer passenden Linse scharf sehen. Der Vorzug dieser Methode vor der Ophthalmoskopie im aufrechten Bild liegt in der Möglichkeit, ein größeres Feld zu erhalten. Da deshalb auch eine größere Lichtmenge in das Auge geworfen werden muß, so kommt der unfoliierte Spiegel mit gewöhnlichen Lichtquellen nicht in Betracht. Aus praktischen Gründen gilt dasselbe für die Beleuchtung mit undurchlochtem, undurchsichtigem, also seitlich angebrachtem Spiegel und mit seitlich angebrachter Lichtquelle. Dagegen können diese beiden Beleuchtungsmethoden bei der reflexlosen Ophthalmoskopie mit Vorteil angewendet werden, weshalb dieselben auch erst später berücksichtigt werden sollen. Bei der Beleuchtung mit durchlochtem Spiegel finden sich im Beobachtungssystem vier Öffnungen vor, nämlich die Ophthalmoskoplinse, das Spiegelloch und die beiden Pupillen. Die Lukenwirkung der Pupille des beobachtenden Auges wird durch stetige Bewegungen desselben und des Spiegels praktisch so gut wie neutralisiert, und man kann deshalb bei der Berechnung des Feldes von dieser Öffnung absehen, mithin das Spiegelloch als Eintrittspupille des

1) Priestley Smith. A new simple ophthalmoscope. Ophthalmic Review. XXIX. 1910. S. 33.

beobachtenden Auges betrachten. Wird nun dieselbe durch die Ophthalmoskoplinse in der Eintrittspupille des beobachteten Auges abgebildet, so muß ersichtlicherweise ein Teil dieser Pupille vom optischen Bilde unbedeckt bleiben. Denn da kein Licht vom Spiegelloche ausgeht, so stellt das optische Bild desselben das Bild eines undurchsichtigen Schirmes dar. Entweder muß also das Bild des Spiegelloches kleiner als die Pupille des beobachteten Auges sein, oder aber es muß in derselben dezentriert werden. Es folgt hieraus, daß das Spiegelloch, wenn von einer Pupille des Beobachtungssystems die Rede sein kann, dieselbe darstellt. Allgemein sei nun bei den ophthalmoskopischen Methoden, bei welchen die Eintrittspupille des beobachtenden Auges in der des beobachteten abgebildet wird, K der Vergrößerungskoeffizient bei dieser Abbildung, und sei deshalb hier dieselbe Bezeichnung für die Abbildung des Spiegelloches angewendet. Da die Abbildung durch die Ophthalmoskoplinse eine umgekehrte ist, hat K einen negativen Wert, und stellt $-Kl$ den Durchmesser des Bildes dar, wenn wie oben l den Durchmesser des Spiegelloches bezeichnet. Läßt man weiter D_o und L_o die Brechkraft und den Durchmesser der Ophthalmoskoplinse bezeichnen, so erhält man unter Berücksichtigung, daß der Abstand zwischen der Linse und der Eintrittspupille des beobachteten Auges gleich $\frac{1-K}{D_o}$ ist, für die charakteristischen Feldwinkelgrößen die Werte

$$\operatorname{tg}\frac{v}{2} = \frac{D_o\,(L_o - Kl)}{2\,(1-K)} \qquad \operatorname{tg}\frac{\omega}{2} = \frac{D_o\,(L_o + Kl)}{2\,(1-K)}$$

Da aber Kl sehr klein im Verhältnis zu L_o ist, so spielt die durch den Unterschied dieser beiden Winkel repräsentierte Vignettierung gar keine Rolle in praktischer Hinsicht, und man kann deshalb den Öffnungswinkel ω_o des Beobachtungssystems durch die Gleichung

$$\operatorname{tg}\frac{\omega_o}{2} = \frac{D_o\,L}{2\,(1-K)}$$

definieren, die Öffnung desselben einfach durch die Zahl $\frac{D_o\,L}{1-K}$ angeben.

Bei der Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild braucht der Spiegel nicht schief auf der Achse der vor dem beobachtenden Auge eingeschobenen Korrektionslinse zu stehen, sondern diese liegt der Rückseite des Spiegels dicht an. Mit hinreichender Genauigkeit kann man deshalb bei der Berechnung der Vergrößerung im Beobachtungssystem das Loch selbst als Ort der Linse behandeln. Da nun bei der praktischen Ausführung nicht immer das volle Feld verwertet werden kann und in Übereinstimmung hiermit das Spiegelloch nicht immer in der Pupille des beobachteten Auges abgebildet wird, soll hier die Vergrößerung für eine beliebige Einstellung berechnet werden. Es sei hierbei das Zentrum des Spiegelloches bzw. das durch die Ophthalmoskoplinse erzeugte Bild desselben der Punkt M des beobachtenden bzw. des beobachteten Auges. Man hat dann

$$\omega_m = -K\,\omega'_m$$

und erhält durch Einführung der Hauptpunktwinkel auf dieselbe Weise wie im aufrechten Bild

$$-\frac{\omega_h}{\alpha_0} = KB' \cdot \frac{1 + m\,A}{1 + m'\,A'} = KD' (1 - m'_0\,A'_m)(1 + m\,A)$$

Die absolute Vergrößerung ist somit bei $m' = 0$, welcher Fall approximativ bei der gewöhnlichen Untersuchung realisiert wird, gleich KB' und also der Achsenlänge des untersuchten Auges umgekehrt proportional. Überhaupt ist die Vergrößerung in diesem Falle von der Akkommodation des beobachteten Auges unabhängig, sofern die durch dieselbe verursachte Änderung der optischen Einstellung im Beobachtungssystem nicht durch Änderung des Akkommodationszustandes des beobachtenden Auges, sondern durch Änderung des Korrektionsglases kompensiert wird. Läßt man unter derselben Voraussetzung den Abstand m' variieren, während der Abstand der Ophthalmoskoplinse vom beobachtenden Auge konstant gehalten wird, so findet man daß, wenn die Linse dem beobachtenden Auge genähert ist, so daß m' einen negativen Wert hat, die Vergrößerung bei Achsenhypermetropie des beobachteten Auges stärker ist als bei Emmetropie, bei Achsenmyopie aber schwächer. Beim Entfernen der Linse vom Auge nimmt die Vergrößerung im hypermetropischen Auge stetig ab, im myopischen zu, bleibt aber im emmetropischen unverändert. Bei $m'_0 = 0$, in welchem Fall das Spiegelloch im vorderen Fokalpunkt des beobachteten Auges abgebildet wird, ist die Vergrößerung von der Achsenlänge des beobachteten Auges unabhängig und stellt allgemein KD' die absolute Vergrößerung dar, während, wenn die Linse noch weiter vom Auge entfernt wird, das myopische Auge die stärkste, das hypermetropische die geringste Vergrößerung gibt.

Die Abweichung dieser Resultate von der geläufigen Vorstellung beruht darauf, daß man die Größe des von der Ophthalmoskoplinse entworfenen Bildes ins Auge gefaßt hat, während doch der Winkel, unter welchem dieses Bild gesehen wird, maßgebend sein soll.

Läßt man beim Entfernen der Linse vom beobachteten Auge die entstehende Veränderung der optischen Einstellung im Beobachtungssystem durch Änderung des Akkommodationszustandes des beobachtenden Auges kompensieren, so sind die Veränderungen der Vergrößerung qualitativ dieselben, aber der Punkt, wo die Vergrößerung von der Achsenlänge des beobachteten Auges unabhängig ist, hat eine andere Lage. Das allgemeine Abbildungsgesetz ergibt als Bedingung dafür, daß der Augenhintergrund scharf gesehen wird,

$$\frac{A_m}{K^2} = \frac{D_{00}}{K} - A'_m$$

wo D_{00} die Brechkraft des aus der Ophthalmoskoplinse und dem Korrektionsglase zusammengesetzten Systems darstellt. Mit Hilfe dieser Gleichung und den früher angegebenen Beziehungen zwischen A bzw. A' und A_m bzw. A'_m kann A aus dem Faktor $1 + m\,A$ eliminiert werden. Es ergibt sich dann ein ziemlich komplizierter Ausdruck, welcher aber, wenn man auf dieselbe Weise wie im aufrechten Bild die höheren Potenzen der Werte

vom Typus m A wegläßt, durch Serienentwicklung in die Approximativformel

$$-\frac{\omega_h}{\alpha_0} = KB'(1 + K\,m\,D_{00} - (m' + K^2 m)\,A') =$$
$$= KD'(1 + K\,m\,D_{00} - (m'_0 + K^2 m)\,A')$$

überführt wird. Nach derselben erhält man unter Anwendung ein und derselben Korrektionslinse die gleiche Vergrößerung in verschiedenen achsenametropischen Augen, wenn das Spiegelloch in einem Punkte abgebildet wird, welcher um den Betrag $K^2 m$ dem beobachteten Auge näher als der vordere Brennpunkt desselben liegt. Da aber K^2 bei der praktischen Ausführung selten den Wert von $^1/_9$ übersteigt, so ist der Unterschied nicht groß.

Wird beim Entfernen der Linse vom beobachteten Auge der Abstand derselben vom Untersuchcrauge nicht konstant gehalten, so werden die Formeln für den Rahmen dieser Darstellung zu kompliziert, um eine Diskussion derselben hier zu geben.

Ist das untersuchte Auge astigmatisch, und läßt man A'_1 A'_2 die Refraktion desselben im ersten bzw. zweiten Hauptschnitt darstellen, während K_1 bzw. K_2 den Wert bezeichnet, den der Koeffizient $\frac{\omega_h}{\omega'_h}$ bei der Einstellung des beobachtenden Auges auf die abbildbaren Linien des ersten bzw. zweiten Systems annimmt, so ergibt sich durch Serienentwicklung die Approximativformel der astigmatischen Verzerrung

$$\frac{K_1}{K_2} = 1 - (m' + K^2 m)\,(A'_1 - A'_2)$$

Für den Fall, daß eine oder beide Abbildungen durch optische Projektion ersetzt werden, erhält man auf analoge Weise wie im aufrechten Bild die gleiche Formel, in welcher aber m den Abstand des betreffenden Bildes des Projektionszentrums vom optischen Zentrum der Korrektionslinse darstellt. Bei der Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild ist jedoch das Spiegelloch so groß, daß es nicht als Projektionszentrum wirkt, und die Vergrößerung so gering, daß auch die Form der Papille mit ruhendem Auge geschätzt wird. Da somit die Pupille das Projektionszentrum darstellt, so hat, wenn man mit dem reduzierten Auge rechnet, m denselben Wert, ob eine Abbildung oder nur eine optische Projektion vorliegt. Man ersieht aus der Approximativformel, daß die astigmatische Verzerrung bei großem Abstande der Ophthalmoskoplinse vom beobachteten Auge in dieselbe Richtung geht wie im aufrechten Bild, bei Annäherung der Linse an das Auge aber das umgekehrte Verhalten darbietet. Die Einstellung, bei welcher keine astigmatische Verzerrung vorhanden ist, kann praktisch nicht von der Einstellung unterschieden werden, bei welcher das Spiegelloch in der Pupille des untersuchten Auges abgebildet wird. Daraus, daß bei $m' = 0$ die absolute Vergrößerung von der Brechkraft des optischen Systems des beobachteten Auges unabhängig ist, könnte man geneigt sein, zu schließen, daß bei dieser Einstellung keine astigmatische Verzerrung vorhanden wäre. Daß dies aber nicht mathematisch genau ist, geht aus dem Begriffe der

absoluten Vergrößerung hervor, welche eine emmetropische Einstellung des Beobachterauges voraussetzt. Bei $m' = 0$ würde deshalb nur dann die astigmatische Verzerrung behoben sein, wenn der Beobachter beim Übergang von der einen Abbildung zur anderen die Korrektionslinse wechselte, so daß die emmetropische Einstellung unverändert bliebe.

Auf dieselbe Weise wie im aufrechten Bild und unter derselben Voraussetzung, nämlich daß das optische Zentrum der Korrektionslinse sich im vorderen Brennpunkte des beobachtenden Auges befindet, erhält man für den Vergrößerungskoeffizienten bei der Abbildung der Netzhaut des beoachteten Auges auf der des beobachtenden den Wert

$$-\frac{KD'}{D}(1 - m'_0 A'_m)$$

Die Lichtstärke des Beobachtungssystems erhält man aus denselben Formeln wie für die Ophthalmoskopie im aufrechten Bild, indem man in denselben den Abstand $m' - d$ des Spiegelloches von der Korrektionslinse gleich Null macht. Der sich ergebende Wert für p_n ist, wenn derselbe nicht kleiner als der Durchmesser der Eintrittspupille ist, durch den letzteren zu ersetzen.

Im Beleuchtungssystem ist schon oben die Bedingung der Lochgröße $-Kl < p$ formuliert worden. Ist dieselbe nicht erfüllt, so muß man sich mit einer Dezentration aushelfen, indem man nur einen Teil des Spiegellochbildes die Pupille des beobachteten Auges decken läßt. Hier soll nur der Fall des zentrierten Systems untersucht werden, bei welchem das Beleuchtungssystem im Zentrum der Pupille des Auges das Bild eines schattenwerfenden Schirmes aufweist, so daß man tatsächlich mit einer ringförmigen Öffnung zu rechnen hat. Außer derselben sind als Öffnungen teils die Ophthalmoskoplinse, teils der Umriß der Lichtquelle in Betracht zu ziehen, während dem Spiegel eine solche Größe gegeben wird, daß derselbe auf den Strahlenraum ohne Einfluß ist. Das in dem vor dem Auge belegenen Medium durch die Ophthalmoskoplinse erzeugte Bild der Lichtquelle mag, wie bei der Untersuchung des aufrechten Bildes, den Durchmesser q haben, während c mit demselben Vorzeichen wie dort den Abstand desselben vom Bilde des Spiegelloches darstellt. Es sei ferner K' die Winkelgröße der Lichtquelle im Zentrum des Spiegelloches, während $\frac{q}{c} = K''$ gesetzt wird. Durch den angulären Vergrößerungskoeffizienten erhält man dann $K'' = -\frac{K'}{K}$.

Auf diese Weise lassen sich dieselben Formeln wie für das aufrechte Bild anwenden, solange es sich nicht um den Einfluß der Öffnung der Ophthalmoskoplinse handelt, indem d durch m', und K' durch K'' ersetzt wird und für l der Wert $-Kl$ in Anwendung kommt. Die Bedingung des Lichtquellenbildes

$$q > -Kl\,|1 + cA|$$

ohne deren Erfüllung ein Vollschatten des Spiegelloches auf dem ophthalmoskopischen Bilde sichtbar wird, ist dann bei $m' = 0$ streng gültig. Unter

dieser Bedingung ist der Flächeninhalt der nützlichen Pupille P_n gleich dem kleinsten der beiden Werte

$$P_n' = \frac{\pi}{4}(p^2 - K^2 l^2) \qquad P_n'' = \frac{\pi}{4}\left(\frac{q^2}{(1+cA)^2} - K^2 l^2\right)$$

und die charakteristischen Feldwinkelgrößen gleich bzw.

$$w = \frac{p+q}{c} \qquad \lambda = \frac{p-q}{c}$$

Zur Bestimmung der besten Form des Spiegels im Falle $m' = 0$ hat man nur in die Gleichung

$$-\frac{K^2}{c} = KD_0 + D_s + A_s$$

wo D die Brechkraft des Spiegels, A_s die reduzierte Konvergenz des auf denselben fallenden Strahlenbündels darstellt, den gewünschten numerischen Wert von c einmal mit positivem, einmal mit negativem Vorzeichen einzuführen, da q in beiden Fällen den gleichen Wert hat. Man erhält auf diese Weise zwei Werte D_{s1} bzw. D_{s2}, welche durch die Beziehung

$$D_{s1} + D_{s2} = -2(KD_0 + A_s)$$

voneinander abhängig sind. Man hätte also, wenn bei der praktischen Ausführung der Untersuchung das Spiegelloch stets in der Pupille des beobachteten Auges abgebildet würde, zwischen zwei gleich günstigen Spiegelformen zu wählen. Da aber aus weiter unten zu erörternden Gründen m' sehr oft einen negativen Wert hat, so ist unter den beiden Spiegelformen diejenige auszuwählen, welche hierbei die vorteilhafteste ist. Auf ganz dieselbe Weise wie bei der Ophthalmoskopie im aufrechten Bild ergibt sich, daß, je nachdem m' einen positiven oder negativen Wert hat, ein negativer bzw. positiver Wert von c von größerem Vorteil für das Feld des Beleuchtungssystems ist. Für den allgemeinen Gebrauch ist demnach ein positiver Wert von c vorzuziehen. Hierdurch sind Konkavspiegel von solcher Stärke, daß das von denselben erzeugte Bild der Lichtquelle zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte der Ophthalmoskoplinse liegt, von der Wahl ausgeschlossen, indem $-(KD_0 + A)$ die maximale Brechkraft des Spiegels angibt. Bei einem Spiegel mit dieser Brechkraft wird die Lichtquelle auf der Netzhaut des emmetropischen Auges abgebildet, und das ganze Feld ist unvignettiert. Letzterer Vorteil wird aber gewöhnlich dadurch vereitelt, daß die praktisch zur Verfügung stehenden Lichtquellen keine hinreichend gleichmäßige Helligkeit haben. Es ist deshalb vorzuziehen, eine etwas größere Brennweite für den Spiegel zu wählen, wobei das unvignettierte Feld verkleinert, das volle Feld aber vergrößert wird. Wollte man auf diese Weise die Verkleinerung von c dahin gehen lassen, daß $q = p$ wäre, so würde man dadurch das unvignettierte Feld im emmetropischen Auge bis auf den Wert Null einschränken. Da nun die Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild nicht so sehr dem Zwecke der Detailuntersuchung wie dem Zwecke des Über-

sichtsbildes dient, so würde sich dieses Verhalten als eine Abnahme der Lichtstärke kundgeben. Um diese Lichtschwäche zu vermeiden, tut man am besten, die Krümmung des Spiegels nicht mehr zu verkleinern, als gerade nötig, um auch bei den höchsten Graden von Myopie die Ungleichmäßigkeit der Lichtquelle nicht auf dem Bilde zu erkennen. Wo diese Grenze liegt, beruht auf der Beschaffenheit der Lichtquelle und läßt sich nur durch Versuche ermitteln. Da hierzu kommt, daß verschiedene Untersucher nicht nur verschiedene Lichtquellen, sondern auch verschiedene Abstände derselben vorziehen, so ist es verständlich, daß Krümmungsradien zwischen etwa 60 und 30 cm angewendet werden. Die längere Brennweite gibt unter sonst gleichen Umständen ein größeres Feld, aber einen kleineren unvignettierten Teil desselben, wodurch der Eindruck einer geringeren Lichtstärke entsteht. Noch deutlicher ist dies bei der Anwendung des Planspiegels.

Durch Annäherung der Lichtquelle an den Spiegel, während das beobachtete Auge vor Licht geschützt wird, kann man es ohne Schwierigkeit dahin bringen, daß das volle Feld des Beobachtungssystems erleuchtet ist. Bei der praktischen Ausführung der Untersuchung ohne künstliche Pupillenerweiterung verengt sich aber hierbei die Pupille und wird der Hornhautreflex so störend, daß man lieber auf dieses große Feld verzichtet und die Lichtquelle neben dem zu untersuchenden Auge wie zur Untersuchung im aufrechten Bild aufstellt. Man kann aber dann mit kleinen Bewegungen des Spiegels jeden Teil des Beobachtungsfeldes erleuchten.

Der Durchmesser des Spiegelloches richtet sich allgemein nach der anzuwendenden Vergrößerung und soll so gewählt werden, daß die Bedingung der Lochgröße in der Mehrzahl der Fälle erfüllt ist, soll aber auch nicht kleiner gemacht werden. Da es sich nun im allgemeinen nicht empfiehlt, ohne künstliche Dilatation der Pupille des beobachteten Auges eine stärkere Vergrößerung als $K = -\frac{1}{3}$ anzuwenden, so sollte das Loch allgemein einen Durchmesser von 4 mm haben. Man hat dann den Vorteil der größeren Lichtstärke im Beobachtungssystem und erhält gewöhnlich beim Schließen des anderen Auges eine hinreichend große Pupille, um diese Lochgröße auszunutzen. Auf der anderen Seite ist die Bedingung der Lochgröße, besonders wenn man sich mit einer geringeren Vergrößerung im Beobachtungssystem begnügt, auch bei sehr kleinen Pupillen erfüllt. Wer aber allgemein eine stärkere Vergrößerung wünscht, muß auch ein kleineres Spiegelloch haben. Der Durchmesser des Spiegels soll so groß sein, daß das Bild der Pupille des beobachteten Auges vollständig von der spiegelnden Fläche bedeckt wird, und muß demnach wenigstens 30 mm betragen. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so geht ein Teil des Lichtes im Beleuchtungssystem verloren.

Bei der praktischen Ausführung der Untersuchung fängt man immer mit einem kürzeren Abstande der Linse vom beobachteten Auge an, um dann durch Vergrößern dieses Abstandes das Feld des Beobachtungssystems zu erweitern. Hat man es auf diese Weise dahin gebracht, daß nichts vom Irisrande zu sehen ist, so hat man praktisch die Einstellung gefunden, bei welcher das Spiegelloch in der Pupille des beobachteten Auges abgebildet wird. Diese Einstellung erfordert aber bei kleiner Pupille teils eine ruhige Hand, teils auch eine gewisse Dozilität seitens des Untersuchten, indem ge-

ringe Bewegungen des beobachteten Auges genügen, um das Feld vollkommen zu verdunkeln, wobei man wieder die richtige Einstellung auf dieselbe Weise aufsuchen muß. Aus diesen Gründen wird sehr oft, besonders von Anfängern oder bei mangelnder Dozilität des Untersuchten, die weniger empfindliche Einstellung mit kürzerem Abstande der Linse vorgezogen, weshalb auch oben bei der Wahl der Spiegelform die bei negativem Werte von m′ günstigere vorgezogen wurde. Bei diesen Änderungen des Abstandes der Ophthalmoskoplinse wird auch der Abstand des Bildes des Augenhintergrundes vom Auge des Untersuchers geändert. Damit nun die dadurch bedingte Einstellungsänderung dieses Auges bei hinreichender Vergrößerung des ophthalmoskopischen Bildes nicht zu groß ausfalle, soll die Brechkraft der Ophthalmoskoplinse keinen zu hohen Wert haben. Auf der anderen Seite darf dieselbe nicht schwächer sein, als daß man die dieselbe führende Hand an die Stirn des Untersuchten stützen kann. Die hierdurch angegebene untere Grenze — etwa 14 dptr — dürfte deshalb den besten Wert darstellen. Eine Öffnung von 50 mm kann mit Vorteil ausgenutzt werden.

Mit der einfachen Ophthalmoskopie ist es in vielen Fällen unmöglich, die Maculagegend zu untersuchen, und bei minimaler Pupille kann sogar die Untersuchung überhaupt unmöglich sein. Man erhält stets den Eindruck, als wäre der Hornhautreflex das wesentliche Hindernis. Als ein Übergang zu den Methoden der reflexlosen Ophthalmoskopie sei hier zunächst die Möglichkeit der **Beseitigung des Hornhautreflexes** untersucht. Es ist nämlich offensichtig, daß man erst dann entscheiden kann, ob diese notwendige Bedingung der reflexlosen Ophthalmoskopie auch hinreichend ist, wenn man über Methoden verfügt, bei welchen dieselbe erfüllt ist.

Wenn man das sich vom Lichtquellenmedium unter Spiegelung des Lichtes in der vorderen Hornhautfläche zur Eintrittspupille des beobachtenden Auges erstreckende optische System — das erste katadioptrische System — untersuchen will, so geschieht dies, wenn es sich um die gewöhnliche Untersuchung im aufrechten Bild handelt, am einfachsten durch eine Untersuchung des Strahlenraumbildes in dem Medium, wo sich das Licht nach erfolgter Spiegelung im Augenspiegel und vor der Reflexion in der Hornhaut bewegt. Man braucht hierbei nur auf zwei Öffnungen Rücksicht zu nehmen, nämlich die des Spiegels und des Spiegelloches. Erstere Öffnung gehört schon dem fraglichen Medium an, und das in diesem liegende Bild der letzteren ist das Hornhautspiegelbild des Loches. Wenn man also alle geraden Linien zieht, welche durch die Spiegelöffnung und durch das Hornhautspiegelbild des Loches gehen, so hat man das maximale Strahlenraumbild des ersten katadioptrischen Systems im betreffenden Medium. Wenn eine andere Öffnung, die Fassung der Korrektionslinse oder die Pupille des beobachtenden Auges, als Luke wirkte, so würde dieser Strahlenraum nur etwas eingeengt werden. Es leuchtet nun ein, daß es genügt, das vom Spiegel entworfene Bild der Lichtquelle außerhalb dieses Strahlenraumes zu verlegen, um den Hornhautreflex zu beseitigen; denn da keine Linie des Strahlenraumbildes durch das Bild der Lichtquelle geht, so kann kein von derselben ausgegangener Strahl das System passieren, d. h. durch das Spiegelloch zum beobachtenden Auge dringen. Bei der Anwendung eines durchsichtigen undurchlochten Spiegels tritt an Stelle des Hornhautspiegelbildes

des Spiegelloches das der Pupille des beobachtenden Auges oder der Fassung der Korrektionslinse, wenn eine solche angewendet wird. Es gibt aber auch ein anderes Mittel, den Hornhautreflex zu beseitigen, wenn der Spiegel ein Loch hat. Da nämlich dieses einen Schatten wirft, so ist es auch hinreichend, die Liehtquelle so aufzustellen, daß der Vollsehatten des Loches das Hornhautspiegelbild desselben deckt. Die Spitze des Vollsehattenkegels ergibt sich aus der Gleiehung

$$\frac{x}{l} = \left| \frac{x+c}{q} \right|$$

Setzt man in derselben x gleich dem Abstande des Hornhautkrümmungszentrums vom Spiegelloch, so erhält man bei einem gegebenen Werte von e den Wert, den q nicht übersteigen darf, wenn das Hornhautspiegelbild des Loches im Vollschatten liegen soll. Man kann dies praktiseh durch Entfernen der Lichtquelle erzielen. Ist auf diese Weise der Vollschatten hinreichend geworden, so gibt es sich dadurch kund, daß der Hornhautreflex verschwindet, sobald man denselben absichtlich mögliehst genau beleuchtet. Man kann deshalb entweder an demselben vorbeisehen oder ihn zum Verschwinden bringen, wenn er gerade im Wege liegt. Obwohl das Feld und die Lichtstärke sehr gering sind, gelingt es auf diese Weise in vielen Fällen, den kleinen Foveareflex zu sehen, wo dies mit der gewöhnlichen Untersuchung unmöglieh ist. Eine hinreichende Liehtstärke erhält man aber mit der Nernstspaltlampe, die ich ursprünglich zur Anwendung bei der Ophthalmometrie konstruierte, deshalb auch ophthalmometrische Nernstlampe benannte. Dieselbe besteht aus einem geschlossenen Rohre, in dessen einem Ende die Nernstlampe eingeführt ist, während das glühende Stäbchen derselben durch ein Linsensystem in einem im anderen Ende angebrachten Spalte abgebildet wird, so daß der Spalt die anzuwendende Lichtquelle darstellt. Mit derselben erhält man bei vertikal stehendem Spalte ein hinreichend helles Bild und kann in den meisten Fällen die Maculagegend ohne Dilatation der Pupille untersuchen. Zwar wird das Feld bei enger Pupille immer kleiner, aber sogar bei eserinisierter Pupille ist es auf diese Weise möglich, ein kleines Feld in der Fovea zu sehen. Ist der Abstand des Spaltes vom Spiegel zu groß, so ist die Bedingung des Lichtquellenbildes nicht erfüllt sondern man sieht im beleuchteten Felde einen zentralen dunklen Fleek, weleher die Bewegungen des Spiegels mitmacht. Wenn man aber mit einem Konkavspiegel von etwa 15 cm Radius den Spalt in einem 12 bis 15 cm betragenden Abstande vom Spiegel aufstellt und einen Einfallswinkel von annähernd 45^0 anwendet, so verschwindet im allgemeinen dieser Fleck. Daß dies bei der fast linearen Form der Lichtquelle überhaupt möglich ist, beruht darauf, daß das Strahlenbündel nach der Spiegelung nicht nur astigmatisch ist, sondern auch ziemlich hohe Asymmetrienwerte hat. Der zweite Brennpunkt fällt bei dieser Aufstellung nach der Brechung des Lichtes im optischen System des Auges, wenn dieses keine hohe Refraktionsanomalie aufweist, auf die Netzhaut oder in deren nächste Nähe, und im ersten Brennpunkt hat das Strahlenbündel wegen der direkten Asymmetrie eine endliche Dicke. Wenn man diese Untersuchung mit dilatierter Pupille ausführt, so hat man in derselben ein diagnostisches Mittel, dessen Feinheit

bisher nicht erreicht wurde. Das beleuchtete Feld ist dabei hinreichend groß zur bequemen Untersuchung und sehr hell, wozu noch kommt, daß man durch Beseitigung des Hornhautreflexes in den Stand gesetzt wird, den zentralen Teil der Pupille des beobachteten Auges für das Beobachtungssystem zu verwenden, was sonst nicht möglich ist, da hier der Hornhautreflex den Beobachter zu einer seitlichen Bewegung zwingt. Man ist deshalb bei der gewöhnlichen Untersuchung der Maculagegend im aufrechten Bild stets gezwungen, einen für die optische Abbildung weniger günstigen Teil der Pupille im Beobachtungssystem zu verwenden, während mit dieser Methode der **einfachen zentrischen Ophthalmoskopie** das Auflösungsvermögen des optischen Systems des Auges wesentlich größer ist, so daß viel feinere Details erkannt werden können.

Der einzige Nachteil dieser Untersuchungsmethode bei undilatierter Pupille ist das kleine Feld. Zur Beseitigung des Hornhautreflexes muß man, wenn ein größeres Feld bei kleiner Pupille erzielt werden soll, ein Bild der Lichtquelle neben den dünnsten Teil des Strahlenraumbildes des katadioptrischen Systems, also neben das Hornhautspiegelbild des Loches bzw. der Beobachterpupille verlegen. Man erreicht dies, indem man eine passende aplanatische Konvexlinse mit einer planparallelen Glasplatte kombiniert und die Nernstspaltlampe als Lichtquelle anwendet. Wenn der Abstand der Linse von der als Spiegel benutzten Glasplatte richtig bemessen ist, so kann man ein Bild des Spaltes in der Pupillarebene des beobachteten Auges erzeugen. Man findet auch, daß der Hornhautreflex sich ohne Schwierigkeit durch kleine Bewegungen dieses Augenspiegels beseitigen läßt, und daß das beleuchtete Feld eine beträchtliche Größe hat, aber — man sieht in diesem Felde sehr wenig, weil es durch fremdes Licht verschleiert ist. Es ist nun leicht, sich davon zu überzeugen, daß diese Verschleierung von dem in der Hornhaut und in der Linse diffus reflektierten Lichte herrührt. Man braucht dazu nur das Auge ein wenig vom Spiegel zu entfernen. Dieser Versuch beweist, daß es, sobald höhere Ansprüche an die Ausdehnung des Feldes im Beleuchtungssystem gestellt werden, nicht genügt, den Hornhautreflex zu beseitigen, sondern daß auch das diffus in der Hornhaut und in der Linse reflektierte Licht abgehalten werden muß.

Wenn man sich aber mit einem kleineren Felde begnügt, so kann man auch auf diese Weise eine sehr anwendbare Methode gewinnen. Mit einer Linse von etwa 30 dptr Brechkraft und höchstens 10 mm Durchmesser, welche mit einem durchbohrten Planspiegel kombiniert wird, dessen Loch 2 mm im Durchmesser beträgt, erhält man ein zur Untersuchung der Macula ohne Erweiterung der Pupille sehr geeignetes Instrument. Bei horizontalem Spalt kann auch ein Konkavspiegel, je nach der Krümmung desselben, allein oder in Verbindung mit einer Konvexlinse angewendet werden.

Auch im umgekehrten Bild läßt sich der Hornhautreflex ohne Schwierigkeit beseitigen, wenn man, wie es nunmehr möglich ist, über eine passende aplanatische Ophthalmoskoplinse verfügt. Zur Konstruktion des Strahlenraumbildes des ersten katadioptrischen Systems in dem Medium, wo sich das Licht vor der Reflexion in der Hornhaut bewegt, hat man zunächst, da das Licht auch nach der Spiegelung in der Hornhaut des beobachteten Auges durch die Ophthalmoskoplinse gehen muß, bevor es als Hornhautreflex in

die Pupille des beobachtenden Auges eindringt, die Ophthalmoskoplinse und das Hornhautspiegelbild derselben als Öffnungsbilder zu behandeln. Die geraden Linien, welche durch diese beiden Öffnungsbilder gezogen werden können, stellen das maximale Strahlenraumbild dar. Wird nun das von der Ophthalmoskoplinse erzeugte Bild der Pupille des beobachtenden Auges außerhalb dieses Strahlenraumes verlegt, so ist es einleuchtend, daß dieser maximale Strahlenraum dadurch auf den Wert Null reduziert wird, indem das durch die Hornhaut reflektierte Licht wohl nach der Reflexion wieder die Ophthalmoskoplinse passiert, aber nicht in die Pupille des beobachtenden Auges eindringen kann, und somit kein einziger Lichtstrahl das System vom ersten Medium zum letzten passieren kann. Um bei der praktischen Ausführung der einfachen Ophthalmoskopie im umgekehrten Bild auf diese Weise mit aplanatischer Ophthalmoskoplinse den Hornhautreflex zu beseitigen, muß man dafür sorgen, daß das Hornhautspiegelbild dieser Linse nicht die ganze Pupille ausfüllt, indem man den Blick des beobachteten Auges auf einen nahe dem Rande der Linse belegenen Punkt richten läßt. Wenn dann diese in der richtigen Entfernung vom beobachteten Auge gehalten wird, braucht man nur dieselbe ein wenig in der Richtung nach der Blicklinie des beobachteten Auges zu dezentrieren, um den Hornhautreflex verschwinden zu sehen. Es zeigt sich nun, daß, wenn dieser Versuch bei sehr kleiner Pupille gemacht wird, das Bild des Augenhintergrundes wieder von fremdem Lichte verschleiert ist. Dieser Versuch beweist, daß bei mäßiger Ausdehnung des beleuchteten Feldes doch das diffus in Hornhaut und Linse reflektierte Licht ausgeschlossen werden muß, sobald die Pupille klein ist. Da die Lichtdichte in einem Lichtstrome umgekehrt dem Querschnitte desselben proportional ist, so gewinnt überhaupt das diffus reflektierte Licht um so mehr an Bedeutung, je größer das beleuchtete Feld auf der Netzhaut ist, im Verhältnis zu dem im Beleuchtungssystem angewendeten Teil der Pupille.

Die Bedingung, deren Erfüllung zum Ausschalten des in Hornhaut und Linse diffus reflektierten Lichtes notwendig und hinreichend ist, läßt sich am einfachsten dahin formulieren, daß kein Teil der Hornhaut oder der Linse des beobachteten Auges auf einmal im Strahlenraum des Beleuchtungssystems und in demjenigen des Beobachtungssystems belegen sein darf.

Wenn man für **die reflexlose Ophthalmoskopie** die absolute Forderung aufstellt, daß sowohl das regelmäßig in den Trennungsflächen des Auges wie das diffus in der Hornhaut und in der Linse reflektierte Licht ausgeschlossen werden soll, so deckt sich die Bedingung der reflexlosen Ophthalmoskopie mit der eben ausgesprochenen. Denn wenn kein vom Lichte getroffener Teil der vorderen Hornhautfläche im Strahlenraum des Beobachtungssystems liegt, so kann auch kein vom beleuchteten Teile dieser Fläche ausgehender Lichtstrahl in die Pupille des beobachtenden Auges eindringen, und auf dieselbe Weise verhält es sich mit den anderen spiegelnden Flächen, so daß tatsächlich in den drei katadioptrischen Systemen kein Strahlenraum vorhanden ist. Da nun aber, wenn ein kleiner Teil der Hornhaut auf einmal in beiden Strahlenräumen belegen ist, die Folge davon keine andere zu sein braucht, als daß ein schmaler peripherer Saum des ophthalmoskopischen Feldes verschleiert erscheint, während, wenn der Horn-

hautreflex nicht ausgeschlossen ist, das ganze Bild unsichtbar werden kann, so muß auch noch gefordert werden, daß, wenigstens im ersten katadioptrischen System, am besten aber in allen dreien, die Lichtquelle, wenn ein Strahlenraum vorhanden ist, außerhalb desselben belegen ist. In Übereinstimmung hiermit habe ich die Bedingung der reflexlosen Ophthalmoskopie auf folgende Weise formuliert.

Es muß ein Teil des Augenhintergrundes, es darf aber kein Teil der Hornhaut oder der Linse des beobachteten Auges auf einmal im Strahlenraum des Beleuchtungssystems und in demjenigen des Beobachtungssystems belegen sein, während gleichzeitig in den drei katadioptrischen Systemen die Lichtquelle, wenn ein Strahlenraum vorhanden ist, außerhalb desselben belegen sein muß.

Zu dieser Definition ist zu bemerken, daß in derselben das Beleuchtungssystem die Lichtquelle als eine Blendenöffnung enthält, während sich die

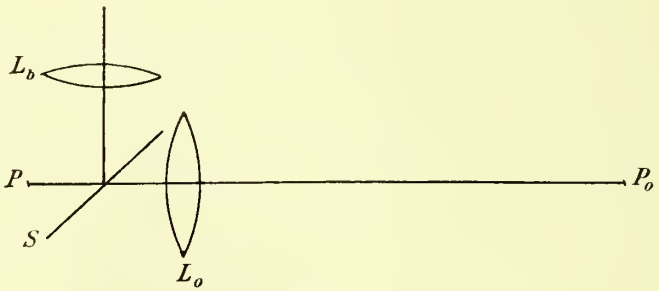


Fig. 10.

drei katadioptrischen Systeme nach dieser Richtung nur bis zum Lichtquellenmedium erstrecken.

Die zentrische reflexlose Ophthalmoskopie läßt sich unter Erfüllung dieser Bedingung am vorteilhaftesten nach dem in der Fig. 10 dargestellten Schema realisieren, wo PP_o die Mittelpunkte der Eintrittspupillen des untersuchten bzw. ophthalmoskopierenden Auges, L_o bzw. L_b eine dem ophthalmoskopischen bzw. dem Beleuchtungssystem zugehörige Linse und S eine dünne, planparallele, um 45^0 geneigte Glasplatte bedeutet. Die beiden auf der Achse der Linse L_o gelegenen Punkte P und P_o werden durch dieselbe ineinander abgebildet. Es soll nun zunächst gezeigt werden, wie diese Anordnung den Bedingungen der Reflexlosigkeit genügen kann. Um mit dem ersten katadioptrischen System anzufangen, sei ohne Berücksichtigung der Pupille des beobachtenden Auges das maximale Strahlenraumbild desselben im Lichtquellenmedium konstruiert. Da im betreffenden Strahlenraum nur zwei Öffnungen vorhanden sind, nämlich die der beiden Linsen, und da die Öffnung der Linse L_b schon im Lichtquellenmedium gelegen ist, so bleibt nur übrig, die Öffnung der Linse L_o abzubilden, wobei das Licht zunächst durch den Spiegel S geht, dann sukzessive in der Hornhaut und in diesem Spiegel reflektiert wird, um schließlich durch die Linse

L_b zu gehen. Das so erhaltene Bild der Linse L_o stellt den dünnsten Querschnitt des Strahlenraumbildes des ersten katadioptrischen Systems dar und ist in der Nähe des durch die Linse L_b erzeugten Bildes der Pupille des beobachteten Auges belegen. Ist diese maximal dilatiert, so bleibt hier hinreichend Platz für eine Lichtquelle übrig, welche somit innerhalb des durch die Pupille des beobachteten Auges und die Linse L_b bestimmten maximalen Strahlenraumes des Beleuchtungssystems, aber außerhalb des Strahlenraumes des ersten katadioptrischen Systems belegen ist. Auf dieselbe Weise wird der Strahlenraum des dritten katadioptrischen Systems ermittelt, während es sich bei der Untersuchung des zweiten katadioptrischen Systems empfiehlt, die Pupille des beobachtenden Auges von vornherein in Rechnung zu ziehen. Da das Bild derselben im Zentrum der Pupille des beobachteten Auges gelegen sein soll, so ist dies auch mit den von der Linse L_b entworfenen Bildern der beiden Pupillen im Lichtquellenmedium der Fall, indem das erstgenannte Bild auf der vorderen Linsenfläche belegen ist und folglich mit dem Spiegelbilde in dieser Fläche zusammenfällt. Die ausführliche Rechnung[1]) ergibt unter Zugrundelegung des exakten schematischen Auges, daß, wenn beide Linsen eine Brechkraft von 14 dptr und eine Öffnung von 50 mm haben und zusammen mit dem zunächst als unendlich dünn angesehenen Spiegel S so aufgestellt sind, daß die eine das Spiegelbild der anderen darstellt, bei 6 mm Durchmesser der Eintrittspupille sowohl des ophthalmoskopierenden wie des untersuchten Auges, und bei einer Abbildung jener Pupille unter dreimaliger Verkleinerung in dieser, kein von den drei spiegelnden Flächen des Auges regelmäßig reflektiertes Licht in die Pupille des beobachtenden Auges eindringt, sobald in der Ebene der Eintrittspupille des beobachteten Auges eine zentrale Partie von rund 2,4 mm Durchmesser vor Licht geschützt wird. Da in den Strahlenräumen des ersten und dritten katadioptrischen Systems keine Rücksicht auf die Pupille des beobachtenden Auges genommen wurde, so gelangt das von der Hornhaut und von der hinteren Linsenfläche regelmäßig reflektierte Licht überhaupt nicht in die Linse L_o hinein.

Um auch das durch Hornhaut und Linse diffus reflektierte Licht vom ophthalmoskopischen Bilde fernzuhalten, muß aber der dem Bilde der Lichtquelle in der Eintrittspupille des beobachteten Auges angewiesene Platz noch wesentlich eingeschränkt werden. Die Strahlenräume des Beobachtungs- und des Beleuchtungssystems, welche beide in der Eintrittspupille des beobachteten Auges eine Einengung haben, müssen dazu so weit auseinander geschoben werden, daß sowohl an der vorderen Hornhautfläche wie an der hinteren Linsenfläche ein Punkt im freien Raum zwischen beiden Strahlenräumen liegt. Dies wird am besten durch Konstruktion der Strahlenraumbilder in dem zwischen dem Spiegel S und der Hornhaut gelegenen Medium illustriert. Wenn das beobachtete Auge emmetropisch ist, und der beleuchtete Teil des Augenhintergrundes sich vollständig mit dem im ophthalmoskopischen System sichtbaren deckt, so sind die Grenzlinien der Durchschnitte dieser Strahlenraumbilder mit einer Meridianebene, wie es die Fig. 11 zeigt, zu je vieren parallell zueinander. P'_o ist das Bild der Pupille des beobachtenden

1) Die reflexlose Ophthalmoskopie. Arch. f. Augenheilk. LXVIII, S. 101, 1911.

Auges, und der Mittelpunkt desselben liegt im Zentrum der Eintrittspupille des beobachteten Auges, während L′ ein kleines im peripheren Teil derselben belegenes Bild der Lichtquelle darstellt, und das Strahlenraumbild des Beobachtungs- bzw. Beleuchtungssystems horizontal bzw. vertikal schraffiert ist. Es ist sofort ersichtlich, daß die oben formulierte Bedingung, daß kein Teil der Hornhaut oder der Linse auf einmal innerhalb der Strahlenräume der beiden Systeme gelegen sein darf, damit gleichbedeutend ist, daß sowohl die vordere Hornhautfläche wie das Luftbild der hinteren Linsenfläche den freien rhombischen Querschnitt schneiden müssen. Der Hornhautpol liegt nun rund 3 mm, das Luftbild des hinteren Linsenpoles rund 4 mm vom Luftbilde des vorderen Linsenpoles entfernt. Wenn nun auch bei der Berechnung der Strahlenräume der katadioptrischen Systeme die Eintrittspupille zum Luftbilde des vorderen Linsenpoles verlegt worden ist, so ist es auf der anderen Seite leicht, zu zeigen, daß eine Verschiebung derselben um 0,5 mm nach rückwärts, was auch den tatsächlichen Verhältnissen bei dilatierter Pupille näher kommt, ohne merkbaren Einfluß auf die Strahlenräume ist. Wird der spitze Winkel der freien rhombischen Figur mit ω bezeichnet, und stellt a die in mm gemessene Breite des freien Raumes zwischen den beiden Bildern P'_0 und L′ dar, so genügt es somit, die Bedingung

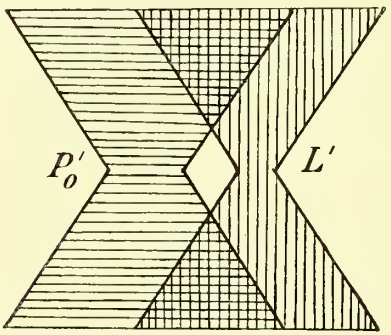


Fig. 11.

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{2} = \frac{a}{7}$$

zu erfüllen, um das diffus in den Augenmedien reflektierte Licht vom ophthalmoskopischen Bilde fernzuhalten. Da es bei der zentrischen reflexlosen Ophthalmoskopie immer möglich ist, durch Abblendung die vignettierten Teile des Feldes sowohl im Beleuchtungs- wie im Beobachtungssystem auszuschließen und die beiden Felder zur Deckung zu bringen, so fällt der durch diese Gleichung bestimmte Winkel in geeigneten Instrumenten mit dem früher mit demselben Buchstaben bezeichneten Winkel zusammen, welcher die charakteristische Winkelgröße des unvignettierten Feldes im Beobachtungssystem angibt, und kann demnach in einem solchen Instrumente als der Öffnungswinkel bezeichnet werden.

Schränkt man die Breite des für das Bild der Lichtquelle disponiblen Raumes auf 1 mm ein, so erhält a bei gut dilatierter Pupille den Wert von 2 mm, aus welchem sich $\omega = 31^0 50'$ ergibt. Hiernach ist es also unter günstigen Umständen möglich, bei der zentrischen, reflexlosen Ophthalmoskopie ein unvignettiertes, schleierfreies Feld von 5 bis 6 Papillendurchmessern zu erhalten, wozu allerdings ein etwas größerer Durchmesser der beiden Linsen als in der oben angeführten Reehnung nötig wäre.

Da die Beleuchtungsstärke auf dem Augenhintergrund des beobachteten

Auges dem Flächeninhalt des Lichtquellenbildes und der spezifischen Intensität der Lichtquelle direkt proportional ist, so kann bei dem kleinen, dem Bilde der Lichtquelle angewiesenen Raum — außer Sonnenlicht und Bogenlicht — nur das Licht der Nernstspaltlampe angewendet werden.

Um eine stärkere Vergrößerung im Beobachtungssystem zu erhalten, ersetzt man die im Punkte P_0 befindliche Eintrittspupille des beobachtenden Auges durch eine Blende, welche die Eintrittspupille eines nach dem Typus des astronomischen Fernrohres gebauten Instrumentes darstellt und durch dasselbe in der Eintrittspupille des beobachtenden Auges abgebildet wird. Es ist dann K laut der früher gegebenen Definition der Vergrößerungskoeffizient bei der Abbildung der Eintrittspupille des beobachtenden Auges in der Ebene der Eintrittspupille des beobachteten Auges und $\omega_h = -K\omega'_h$, wobei K einen positiven Wert hat und das ophthalmoskopische Bild demnach ein aufrechtes ist. Um bei stärkerer Vergrößerung eine genügende Helligkeit zu erhalten, kann man das ohnehin nicht zu bewältigende Feld einschränken, wodurch in der Eintrittspupille des beobachteten Auges mehr Raum für das Lichtquellenbild und für das Bild der Eintrittspupille der Fernrohrlupe gewonnen wird. Man kann dann diese bis zu einem Durchmesser von 10 mm vergrößern und gleichzeitig die Vergrößerung des Lichtquellenbildes durch passende Wahl der Brechkraft und des Ortes der Linse L_b steigern.

Notwendige Bedingung ist auf alle Fälle eine hinreichend aberrationsfreie Abbildung der Blende des Beobachtungssystems und der Lichtquelle in der Eintrittspupille des beobachteten Auges. Man erzielt dieselbe mit den neuen aplanatischen Ophthalmoskoplinsen, welche nach meiner Angabe von Herrn Dr. v. Rohr berechnet worden sind und bei Zeiß hergestellt werden, und in welchen die aplanatische Abbildung durch die Anwendung einer asphärischen Fläche erreicht wird.

Ein Eingehen auf die Details der Konstruktionen bzw. auf die Notwendigkeit, das ohne Reflexion den Spiegel S passierende Licht unschädlich zu machen, würde hier zu weit führen. Die Erfahrung hat gelehrt, daß mit einem Öffnungswinkel von 20^0, also mit einem Felde von 3 bis 4 Papillendurchmessern, eine Vergrößerung von $K = 2$ ausgenutzt werden kann, so daß im größeren Bilde auch entsprechend mehr Details gesehen werden während es bisher unmöglich war, eine stärkere Vergrößerung als die des gewöhnlichen aufrechten Bildes zu verwerten. Die Grenze der nützlichen Vergrößerung dürfte freilich hiermit nicht erreicht worden sein, scheint aber auf der anderen Seite nicht höher als bei $K = 3$ zu liegen.

Daß auch unter Anwendung räumlich ausgedehnterer Lichtquellen der durchbohrte undurchsichtige Spiegel bei der zentrischen Ophthalmoskopie Verwendung finden kann, davon habe ich mich durch besondere Versuche überzeugt. Wegen der unvermeidlichen Vignettierung steht aber diese Methode der mit unbelegtem Spiegel wesentlich nach und soll deshalb auch nicht näher erörtert werden.

Die azentrische reflexlose Ophthalmoskopie, bei welcher auf die Abbildung der Pupille des beobachtenden Auges oder der betreffenden Blende des Beobachtungssystems im Zentrum der Eintrittspupille des beobachteten Auges verzichtet wird, läßt sich, wie aus obenstehender Unter-

suchung hervorgeht, ohne weiteres realisieren, wenn der Abstand a vergrößert wird. Man erhält dadurch allgemein ein im Verhältnis zur Pupillengröße relativ größeres Feld und kann diesen Vorteil nach zwei Richtungen hin ausnutzen, nämlich einesteils um große ophthalmoskopische Übersichtsbilder, anderenteils um eine Methode der reflexlosen Ophthalmoskopie bei enger Pupille zu erhalten. Zu diesen Zwecken wird aber mit Vorteil eine einfachere Methode angewendet, auf welche weiter unten eingegangen werden soll.

Wird ein undurchsichtiger Spiegel zur azentrischen reflexlosen Ophthalmoskopie angewendet, so empfiehlt es sich, denselben ohne Durchbohrung seitlich aufzustellen. Die Bedingung der Reflexlosigkeit ist bei dieser Anordnung sehr leicht zu erfüllen, da der im Beleuchtungssystem wie eine Blende, im Beobachtungssystem wie ein Schirm wirkende Spiegel die Trennung der beiden Strahlenräume zum Teil von selbst besorgt. Diese Methode ist mit großem Erfolge von Dimmer[1]) zur Photographie des Augenhintergrundes ausgearbeitet worden und kommt auch im stationären Augenspiegel von Thorner[2]) zur Verwendung. Nach beiden Methoden wird eine Blende des Beobachtungssystems in der Eintrittspupille des beobachteten Auges abgebildet, aber während ersterer im anderen Teile dieser Pupille die Lichtquelle abbildet, verlegt letzterer an diesen Ort ein Bild einer dem Beleuchtungssystem angehörenden Blende. Bei der Methode von Dimmer ist der Abstand a hinreichend groß, um auch das diffus reflektierte Licht auszuschalten, während dies im Thornerschen Augenspiegel, soweit es die Linse betrifft, nicht der Fall zu sein scheint. Dieses Licht schadet aber hier nicht so viel, da der für das Beleuchtungssystem in Anspruch genommene Teil der Pupille relativ groß ist. Ohne Abbildung einer Blende des Beobachtungssystems in der Pupille des beobachteten Auges hat Wolff[3]) bei seiner Methode der reflexlosen Ophthalmoskopie das Beobachtungssystem vom Beleuchtungssystem durch die Schirmwirkung des Spiegels getrennt. Sowohl Thorner wie Wolff haben auch mit ihren Methoden Photographien des Augenhintergrundes erhalten. Der elektrische Augenspiegel des letzteren ist zum klinischen Gebrauche bestimmt und wird zur Untersuchung im gewöhnlichen aufrechten Bild angewendet, hat aber den Nachteil, daß eine gewisse Weite der Pupille erforderlich ist.

Allen Methoden der reflexlosen Ophthalmoskopie mit einseitig gestelltem, undurchsichtigem Spiegel haftet der Nachteil der einseitigen Vignettierung an.

Ein früher von Schultén[4]) zur einfachen Ophthalmoskopie angegebenes Mittel ist von Thorner[5]) in seiner neuesten Methode der reflexlosen Oph-

1) Fr. Dimmer, Die Photographie des Augenhintergrundes. Wiesbaden 1907.

2) W. Thorner, Die Theorie des Augenspiegels und die Photographie des Augenhintergrundes. Berlin 1903.

3) H. Wolff, Zur Photographie des menschlichen Augenhintergrundes. Arch. f. Augenheilkunde. LIX. S. 115. 1908.

4) Schultén, Beobachtungen des Augenhintergrundes bei hochgradiger Vergrößerung. Arch. f. Anat. u. Physiol. 1883. S. 285.

5) W. Thorner, Ein reflexloser Handaugenspiegel. Zeitschr. f. Augenheilkunde. XXVI. S. 1. 1910.

thalmoskopie angewendet worden, indem die Ophthalmoskoplinse durch einen Konkavspiegel ersetzt wird, welcher sowohl im Beobachtungs- wie im Beleuchtungssystem wirkt. Man braucht hierbei nur eine schmale Lichtquelle bzw. das Spiegelbild einer solchen neben der Eintrittspupille des Auges oder der Fernrohrlupe anzubringen, um die Bedingungen der reflexlosen Ophthalmoskopie zu erfüllen. Die Nachteile der Methode sind teils durch die notwendige Schiefstellung des Spiegels bedingt, wie Astigmatismus und Asymmetrie der zur Abbildung dienenden Strahlenbündel, teils technischer Natur. Ein auf der Rückseite foliierter Glasspiegel gibt doppelte Bilder, von welchen wohl das lichtschwächere im allgemeinen relativ unschädlich sein dürfte, bei gewissen Bildern aber störend sein muß, und andere Spiegel sind zu empfindlich, um in der praktischen Ophthalmoskopie beliebt werden zu können.

Eine Zwischenstellung zwischen der zentrischen und der azentrischen nimmt die reflexlose stereoskopische Ophthalmoskopie ein, indem es, um den maximalen stereoskopischen Effekt zu erhalten, erforderlich ist, daß die beiden Blenden der Beobachtungssysteme nahe den Endpunkten eines Durchmessers der Eintrittspupille des beobachteten Auges abgebildet werden, wobei die Symmetrieachse der beiden Systeme zentrisch liegt. Wenn diese Blenden die Eintrittspupillen zweier Fernrohrlupen darstellen und durch dieselben in den Eintrittspupillen der Augen des Beobachters abgebildet werden, so ist die Bedingung des richtigen stereoskopischen Effektes, daß der Vergrößerungskoeffizient bei dieser Abbildung der Augendistanz dasselbe Vorzeichen wie bei der Abbildung der Pupillen hat. Das astronomische Fernrohr kann deshalb nicht angewendet werden, sondern man muß die Fernrohrlupen nach dem Typus des terrestrischen oder des Prismenfernrohres konstruieren, wobei das den Augen dargebotene Bild des Augenhintergrundes ein umgekehrtes ist. Das Spaltbild kann entweder vertikal in der Mitte zwischen den Blendenbildern oder horizontal über oder unter denselben abgebildet werden. Wenn der Vergrößerungskoeffizient bei der Abbildung der Eintrittspupillen der Fernrohrlupen in der Eintrittspupille des beobachteten Auges $-\frac{1}{3}$ ist, so empfiehlt es sich, einen Abstand von 16 mm zwischen den Mittelpunkten der Blenden zu wählen und diesen einen Durchmesser von 6 mm zu geben. Der Abstand könnte wohl größer gemacht werden, aber das Instrument würde dann nur bei maximaler Pupille anwendbar sein. Auf der anderen Seite dürfte kein Bedürfnis nach einem größeren stereoskopischen Effekt als dem auf diese Weise erhaltenen vorliegen. Die Vergrößerung $K = -1$ kann mit Vorteil angewendet werden.

Auch der oben erwähnte stationäre Augenspiegel Thorners wurde zur stereoskopischen Ophthalmoskopie eingerichtet, indem die für das Beobachtungssystem bestimmte Pupillenhälfte wieder halbiert wurde. Von anderen Übelständen dieser Methode abgesehen, läßt sich auf diese Weise nicht der maximale stereoskopische Effekt erhalten.

Das der reflexlosen Ophthalmoskopie dienende Instrumentarium ist ziemlich kompliziert, was hauptsächlich auf der zur Vermeidung der in der Ophthalmoskoplinse entstehenden Reflexbilder nötigen Trennung des Beobachtungssystems vom Beleuchtungssystem beruht. Will man aber diese Re-

flexbilder mit in Kauf nehmen, so kann das Instrumentarium wesentlich vereinfacht werden. Mit der kleinen Lichtquelle stören dieselben in der Tat sehr wenig und können überdies zum Unterschiede von den in den Trennungsflächen des Auges entstandenen vor eine beliebige Stelle des beobachteten Augenhintergrundes gebracht werden. Da somit auf diese Weise, wenigstens bei nicht zu starker Vergrößerung, die Vorteile der reflexlosen Ophthalmoskopie gewonnen werden können, so habe ich die Methoden, bei welchen die oben formulierte Bedingung der reflexlosen Ophthalmoskopie erfüllt ist, die in der Ophthalmoskoplinse entstehenden Lichtreflexe aber geduldet werden, als die der vereinfachten reflexlosen Ophthalmoskopie bezeichnet. Zu einer solchen Methode braucht man, wenn es sich nur um die Vergrößerung des gewöhnlichen umgekehrten Bildes handelt, nichts anderes als die aplanatische Ophthalmoskoplinse und meinen elektrischen Handaugenspiegel, in welchem der Faden eines Glühlämpchens in einem neben dem die nötige Korrektionslinse enthaltenden Augenspiegelloche und in variablem Abstande von demselben befindlichen Spalte abgebildet wird, während das die Lichtquelle enthaltende Beleuchtungsrohr hinreichend absteht, um das Gesicht des Untersuchers vor einer Beschädigung durch die Erhitzung desselben zu schützen. Bei der Anwendung dieses Spiegels mit der Technik des gewöhnlichen umgekehrten Bildes beginnt man am besten bei undilatierter Pupille mit einem Abstand von 4 bis 5 mm zwischen Spalt und Loch, indem man zur gleichzeitigen Untersuchung von Maeula und Papille die Blickrichtung etwas nasal einstellen läßt. Das Loch, soll immer, wenn bei undilatierter Pupille die Maeula im ophthalmoskopischen Felde ist, zwischen der Gesichtslinie des beobachteten Auges und dem Spalte gelegen sein, zu welchem Zwecke das Beleuchtungsrohr um die optische Achse der Korrektionslinse gedreht werden kann. Die Ophthalmoskoplinse wird mit der am schärfsten gekrümmten Fläche dem Untersucher zugekehrt, zunächst unmittelbar vor das untersuchte Auge gehalten, wobei am temporalen Pupillenrande rötliches Licht sichtbar ist. Sollte dies nicht der Fall sein, so ist entweder der Abstand der Ophthalmoskoplinse vom beobachtenden Auge zu vergrößern oder der Abstand des Spaltes vom Loche zu verkleinern. Die Linse wird dann unter stetiger Beobachtung des rötlichen Lichtes und, indem man darauf achtet, daß die beiden kleinen, in der Linse entstehenden Spiegelbilder einander möglichst decken, von dem beobachteten Auge entfernt. In der richtigen Entfernung ist das Feld voll erleuchtet und reflexfrei, wenn die Linse so weit in nasaler Richtung verschoben wird, wie es mit voll erleuchtetem Felde möglich ist. Sollte sich hierbei ein Schleier zeigen, so ist dies ein Zeichen, daß der Abstand a zu kurz gemacht worden ist. Kann man denselben wegen der Kleinheit der Pupille nicht vergrößern, so kann man in vielen Fällen den unverschleierten Teil des Feldes ohne weiteres benutzen. Wie leicht verständlich ist, entsteht in der Hornhaut das die Maeulagegend des Bildes verschleiernde Licht, während die Papillargegend das in der Linse diffus reflektierte Licht empfängt. Da nun der Abstand der Ophthalmoskoplinse nach beiden Richtungen hin binnen gewisser Grenzen verändert werden kann, ohne daß man das Auftreten des regelmäßig reflektierten Lichtes befürchten muß, so gelingt es bei nicht abnorm enger Pupille ohne weiteres, die Maeula, bzw. die

Papillengegend sehleierfrei zu sehen, indem man die Linse vom untersuehten Auge ein wenig entfernt bzw. demselben nähert. Bei engster Pupille ist es aber nötig, das Feld einzuschränken. Da jedoeh die Lichtquelle einseitig belegen ist, so braucht man nicht diese Einschränkung konzentrisch zu maehen, sondern es genügt, eine reehteckige Blende mit der Ophthalmoskoplinse zu kombinieren, welche in dem auf der Längenausdehnung der Lichtquelle senkreehten Durchmesser das Feld auf das mittlere Drittel einengt, während in dem zur Längsrichtung der Lichtquelle parallelen Durchmesser keine Einschränkung stattfindet. Auf diese Weise kann man mit einem Pupillendurchmesser bis zu 2 mm herunter und mit einer Vergrößerung $K = -\frac{1}{3}$ einen Öffnungswinkel von 30° ausnutzen, somit ein wenigstens 5 Papillendurchmesser betragendes Feld schleierfrei sehen, und wenn der Öffnungswinkel durch die reehteckige Blende in einer Richtung bis auf das Drittel eingeschränkt wird, sogar bei eserinisierter Pupille — obwohl nicht ohne Schwierigkeit — die Macula untersuchen. Bei undilatierter Pupille soll man aber überhaupt nie versuchen, die Maeula im Zentrum des Feldes zu sehen. Denn die Bedingung der Ausschaltung des in der Hornhaut regelmäßig reflektierten Lichtes ist, daß das Bild der Lichtquelle innerhalb der Eintrittspupille des beobachteten Auges, aber außerhalb des Hornhautspiegelbildes der Ophthalmoskoplinse belegen ist, was bei kleiner Pupille und zentrischer Blickrichtung nicht erreicht werden kann.

Um mit dieser Methode bei dilatierter Pupille große Übersichtsbilder zu erhalten, hat man nur den Durchmesser der Ophthalmoskoplinse bei unveränderter Brechkraft zu vergrößern. Wie weit man hierbei gehen kann, läßt sich aus gewissen technischen Gründen nicht a priori bestimmen. Mit schon hergestellten Linsen erreicht man ein Feld von rund 7 Papillendurchmessern.

Zu Demonstrationsaugenspiegeln ist die vereinfaehte Methode der reflexlosen Ophthalmoskopie sehr geeignet. Man braucht dazu nur den Augenspiegel und die Ophthalmoskoplinse auf ein Stativ zu befestigen und kann das Feld einem anderen einstellen, indem man das Stativ so richtet, daß nach den angegebenen Regeln der Lichtspalt im richtigen Teile der Pupille abgebildet wird. Sobald man aber ein Stativ anwendet, ist es angezeigt, die Vorteile desselben auszunutzen, indem das immer als Luke wirkende Loch des Spiegels durch die Eintrittspupille einer Fernrohrlupe ersetzt wird, deren Austrittspupille in der Eintrittspupille des beobachtenden Auges liegt. Auch empfiehlt es sich, um die Vergrößerung steigern zu können, das Glühlämpchen durch die Nernstlampe zu ersetzen, indem entweder der Spalt auf ähnliche Weise wie im elektrischen Handaugenspiegel angeordnet wird oder auch mit einem durchsichtigen Spiegel ein virtuelles Bild desselben neben der Eintrittspupille der Fernrohrlupe erzeugt wird. Bei der Anwendung der Nernstlampe, besonders auf erstere Weise läßt sich eine Vergrößerung $K = 1$ sehr gut anwenden, ohne daß die in der Linse entstehenden Spiegelbilder zu störend sind. Ob auch die stärkeren Vergrößerungen in der zentrischen Ophthalmoskopie mit dieser Methode beliebt sein werden, läßt sich nicht voraussagen, da mit zunehmender Vergrößerung die Spiegelbilder mehr stören, aber auf der anderen Seite

diese Methode ein viel billigeres Instrumentarium zuläßt als die oben beschriebene.

Auch die stereoskopische Ophthalmoskopie läßt sich mit der vereinfachten reflexlosen Methode mit Vorteil ausführen, und zwar bei dem stationären Instrument unter einer Vergrößerung bis zu $K = -1$. Mit etwas geringerer Vergrößerung kann eine geeignete binokuläre Fernrohrlupe in Kombination mit dem Beleuchtungsrohre meines elektrischen Handaugenspiegels und mit der aplanatischen Ophthalmoskoplinse ohne Stativ angewendet werden. Auch der binokulare Augenspiegel von Giraud-Teulon[1]), welcher in der ursprünglichen Form kaum zur Stereoskopie geeignet war, kann durch passende Abänderung in ein mit dem Beleuchtungsrohr und der aplanatischen Ophthalmoskoplinse praktisch sehr abwendbares Instrument verwandelt werden. Der von Fraenkel[2]) konstruierten Modifikation desselben fehlt nur das Beleuchtungsrohr und die richtige Linse. Das von Giraud-Teulon angewendete Prinzip, die Gesichtslinien durch doppelte Spiegelung einander zu nähern, kann aber nie von Lukenwirkung frei werden, weshalb eine binokulare Fernrohrlupe immer vorzuziehen ist.

2. Methoden zur Beobachtung der durchsichtigen Medien und der brechenden Flächen.

Vollkommen durchsichtig ist keine bekannte Substanz, obwohl viele, darunter auch das Kammerwasser des Auges, so viel Licht durchlassen, daß in erhältlicher Schichtdicke keine Absorption oder diffuse Reflexion des Lichtes wahrnehmbar ist. Daß aber Hornhaut und Linse beträchtliche Mengen Licht diffus reflektieren, hat sich schon bei der Würdigung der ophthalmoskopischen Methoden kenntlich gemacht. Um nun diese Reflexion zur Beobachtung der Hornhaut und der Linse anzuwenden, hat man einesteils die physikalischen Bedingungen der Lichtreflexion möglichst günstig zu machen, anderenteils aber auch die Beobachtung des reflektierten Lichtes möglichst zu erleichtern. Eine intensive Beleuchtung mit seitlicher oder wenigstens schiefer Einfallsrichtung des Lichtes ist bei unbeleuchtetem Hintergrunde das beste Mittel hierzu. Bei der in der ophthalmologischen Praxis geübten fokalen Beleuchtung wird die nötige Lichtstärke unter Anwendung der gewöhnlichen Lichtquellen durch eine Konvexlinse erzielt, mit welcher ein kleines Bild der Lichtquelle in kurzem Abstande von dem zu beleuchtenden Teile entworfen wird. Wegen der Aberration der gewöhnlichen Linsen und wegen der bedeutenden räumlichen Ausdehnung der gewöhnlichen Lichtquellen sieht man aber, wenn das optische Bild der Lichtquelle zur Erhöhung der Lichtintensität auf den beobachteten Teil oder in dessen unmittelbare Nähe entworfen wird, eine von der kaustischen Fläche oder von der Lichtquelle selbst herrührende Zeichnung, welche durch Überdeckung der Details die Beobachtung stört. Mit Nernstspaltlampe und aplanatischer Linse fallen diese Übelstände fort, weshalb auch die Methode hiermit um

1) Beschrieben im Handbuch der physiologischen Optik von Helmholtz.

2) Fr. Fraenkel, Demonstration eines binokularen Augenspiegels. Ber. über d. 36. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1910. S. 314.

vieles verfeinert wird. Auf die Beobachtung der Hornhaut, welche nur ophthalmologisches Interesse hat, soll hier nicht eingegangen werden. Die Linse zeigt aber unter physiologischen Verhältnissen mit dieser Methode deutliche Zeichen ihrer für die Dioptrik des Auges bedeutungsvollen Struktur. Um dieselbe, am besten bei künstlich erweiterter Pupille, zu beobachten, stelle man den Spalt in einem Abstande von 40 bis 50 cm auf, wonach mit der aplanatischen Ophthalmoskoplinse, deren schärfer gekrümmte Fläche dem Lichte zugekehrt sein soll, zunächst ein scharfes Bild des Spaltes auf der Hornhaut oder auf der Sklera erzeugt wird. Hat man dies erreicht, so hat man darin das Kriterium, daß die Linse richtig gehalten wird, so daß die Achse derselben den Spalt schneidet. Es ist dann eine leichte Sache, diese Stellung der Linse bei den vorgenommenen Ortsveränderungen derselben beizubehalten bzw. auf dieselbe Weise wiederzufinden. Ohne solche Vorsichtsmaßregeln wird aber der Vorteil der aplanatischen Abbildung vereitelt. Zur Beobachtung dient eine gute Lupe, am besten eine binokuläre. Die Blickrichtung des beobachteten Auges soll immer zwischen der Einfallsrichtung des Lichtes und der Blicklinie des beobachtenden Auges liegen. Wenn dieselbe in der die beiden letztgenannten Linien enthaltenden Ebene verläuft und den von denselben eingeschlossenen Winkel annähernd halbiert, so sieht man bei richtiger Haltung der Linse nicht nur das diffus reflektierte Licht, sondern auch das Licht, welches in den Trennungsflächen regelmäßig reflektiert wird. Wird die Blickrichtung des beobachteten Auges in derselben Ebene entweder der Lichtquelle oder dem Auge des Beobachters mehr genähert, so kann man das regelmäßig reflektierte Licht zum Verschwinden bringen. Erstere Stellung gibt einen kürzeren Lichtweg durch die Linse und empfiehlt sich deshalb zur Untersuchung der tieferen Teile, ermüdet aber das beobachtete Auge mehr wegen des mehr zentralen Lichteinfalles. Man kann bei derselben in der Regel, wenn die Spitze des Lichtkegels an die vordere Linsenfläche verlegt wird, beobachten, wie die Lichtreflexion unmittelbar hinter dem auf der vorderen Linsenfläche sichtbaren schmalen Lichtfleck relativ gering ist, um wieder in kurzem Abstande davon ein Maximum zu erreichen, so daß der Eindruck entsteht, als ob zwei durch diffuse Reflexion entstandene Bilder des Spaltes in kurzem Abstande voneinander lägen. Indem man die Spitze des Lichtkegels etwas tiefer verlegt, findet man gewöhnlich ein zweites relatives Maximum der diffusen Lichtreflexion in der Nähe der hinteren Linsenfläche, welche man dadurch erkennt, daß hier der scharf begrenzte Lichtstrom aufhört. Der Abstand dieses zweiten Maximums von der hinteren Linsenfläche ist scheinbar das Doppelte bis Dreifache des Abstandes des ersten Maximums von der vorderen. Besonders bei älteren Leuten können mehrere solche Maxima beobachtet werden, und im hohen Alter sieht man stets eine stärker lichtreflektierende sternförmige Figur sowohl im vorderen wie im hinteren Kortex, während der Kern eine mehr ins Gelbe oder sogar ins Gelbbraune gehende Färbung aufweist.

Wählt man aber zur Beobachtung diejenige Blickrichtung, bei welcher auch das von der vorderen Linsenfläche regelmäßig reflektierte Licht gesehen wird, so zeigt die Linse schon in der Kindheit eine eigenartige Zeichnung, welche am besten hervortritt, wenn man, nachdem das scharfe

Bild des Spaltes auf die vordere Linsenfläche entworfen worden ist, die Linse dem Auge um einige Millimeter nähert. Man sieht dann die vordere Linsenfläche wie Perlmutter schillern und beobachtet an derselben eine unregelmäßig sternförmige, aus feinen dunklen Linien bestehende zierliche Figur. An den überall zwischen diesen Linien belegenen schillernden Partien kann man ohne Schwierigkeit eine feine netzförmige Zeichnung wahrnehmen. Dieselbe sieht man, wie Heß zuerst gezeigt hat, immer in dem an der vorderen Linsenfläche regelmäßig reflektierten Lichte. Die aus dunklen Linien bestehende Sternfigur ist auch bei der gewöhnlichen fokalen Beleuchtung leicht zu sehen und wird wohl gewöhnlich als ein Strukturbild betrachtet. Daß man dieselbe aber nur dann sieht, wenn regelmäßig reflektiertes Licht von der vorderen Linsenfläche mit im Spiele ist, kann nicht so leicht mit der gewöhnlichen Untersuchung konstatiert werden, geht aber unzweideutig aus den Ergebnissen der fokalen Beleuchtung mit Nernstspaltlampe und aplanatischer Linse hervor. Schon dieser Umstand macht es sehr verdächtig, daß es sich nicht um ein Strukturbild handelt. Dies wird auch durch die Erscheinung der Parallaxe bewiesen. Macht man nämlich bei der letztgenannten Untersuchung seitliche Bewegungen mit der Linse, so verschiebt sich die Sternfigur in entgegengesetzter Richtung, die zentralen Teile desselben mehr als die peripheren, so daß eine auffallende Verunstaltung die Folge wird. Bei vertikalem Spalte und seitlichen Verschiebungen der Linse in der Reflexionsebene ist diese Parallaxe sehr leicht zu konstatieren, sobald man das Schillern richtig sieht. Daß das beobachtete Auge die richtige Blickrichtung hat, konstatiert man am besten dadurch, daß beim Entfernen der Linse das an der vorderen Linsenfläche entstehende Spiegelbild des Spaltes in der Mitte der Pupille sichtbar ist. Da durch die Verschiebung der Linse die Einfallsrichtung des Lichtes allein geändert wird, so beweist die dabei eintretende Verunstaltung der Sternfigur, daß dieselbe kein Strukturbild darstellt.

Was die Deutung der beobachteten Erscheinungen betrifft, so dürfte es zunächst keinem Zweifel unterliegen, daß die beiden Maxima der diffusen Lichtreflexion in der Linsensubstanz der vorderen und hinteren Diskontinuitätsfläche entsprechen, wo die von Heß entdeckten, weiter unten beschriebenen Kernbildchen entstehen. Das perlmutterähnliche Schillern und die netzförmige Zeichnung in dem von der vorderen Linsenfläche regelmäßig reflektierten Lichte ist offenbar ein Diffraktionsbild, welches nach der Ansicht von Heß vom Linsenepithel herrührt. Auf jeden Fall beweist dasselbe, wie auch die Verschwommenheit des in der vorderen Linsenfläche entstehenden Spiegelbildes, daß dasselbe in der Wirklichkeit nicht ausschließlich, wahrscheinlich auch nicht zum größten Teile, an der Vorderfläche entsteht, sondern daß sich auch die oberflächlichen Schichten der Linse dabei beteiligen, wozu noch kommt, daß das an der Diskontinuitätsfläche gespiegelte Licht sich dazumischt. In der Linse haben aber die Isoindizialflächen und mit aller Wahrscheinlichkeit auch die Diskontinuitätsflächen in radiärer Richtung verlaufende Bildungen, welche mit Faltenbildungen verglichen werden können, und welche zum Erzeugen des aus dunklen Linien bestehenden Sternbildes geeignet sind.

Läßt man bei der fokalen Beleuchtung mit Nernstspaltlampe und apla-

natischer Linse die Blickrichtung des beobachteten Auges annähernd mit der Einfallsrichtung des Lichtes zusammenfallen, während man sich selbst so weit von dieser Richtung entfernt, wie es die Pupillengröße zugibt, ohne daß der Blick in die Tiefe des Auges verhindert wird, so kann man, wenn die Linse dem Auge genähert wird, bis die Spitze des Lichtkegels auf die hintere Linsenfläche fällt, auch im Glaskörper den Lichtweg durch diffuse Reflexion erleuchtet sehen. Bei seitlichen Bewegungen der Linse, eventuell unter Annäherung derselben an das Auge, beobachtet man mehrere verschieden tief liegende, wie aus einem Netzwerk bestehende Membranen, welche sich hauptsächlich in frontaler Richtung auszudehnen scheinen. Diese Anzeichen der physiologischen Struktur des Glaskörpers habe ich bisher nur in seltenen Fällen bei ganz jugendlichen Individuen vermißt.

Bei der Untersuchung der Medien im durchfallenden Licht wird in der ophthalmologischen Praxis der Schatten einer Trübung gegen den roten Hintergrund beobachtet, indem mit dem Augenspiegel Licht in das beobachtete Auge geworfen wird und mittels geeigneter Linsen das beobachtende Auge scharf für die Trübung eingestellt wird. Wenn es sich aber nicht um praktisch undurchsichtige Bildungen handelt, sondern nur um geringe Unterschiede des Brechungsindex, wovon die in Glas vorkommenden Schlieren ein physikalisches Beispiel darstellen, so ist es von der größten Bedeutung, daß die Lichtquelle möglichst punktförmig ist. Da nun das auf dem Augenhintergrund mit dem Augenspiegel erzeugte Bild der Lichtquelle bei der Untersuchung als solche fungiert, so ist es einleuchtend, daß zum Verfeinern der Methode dieses Bild bei hinreichender Lichtstärke so klein wie möglich gemacht werden soll. Bei nicht zu starker Ametropie ist es auch eine alte klinische Erfahrung, daß der Planspiegel mehr leistet als der Konkavspiegel. Die höchste Leistung ergibt aber die Nernstspaltlampe, mit welcher man überdies auf oben angegebene Weise den Hornhautreflex durch den Vollschatten des Loches beseitigen kann. Wenn man den Spalt in etwa 40 cm Abstand aufstellt und hinter dem durchlochten Planspiegel bei Emmetropie des eigenen Auges eine Konvexlinse von 10 bis 12 dptr einsetzt, so sieht man, nachdem man sich bei erleuchteter Pupille dem beobachteten Auge hinreichend genähert hat, um den Pupillenrand scharf zu sehen, fast stets eine deutliche Zeichnung, welche von der Verteilung der Flüssigkeit auf der Hornhaut herrührt, und welche, wenn man die Hornhaut mit dem oberen Lide abwischt, den Charakter verändert. Ungeachtet der hierdurch bezeugten Empfindlichkeit der Methode sieht man auf diese Weise keine Spur der bei oben beschriebener Versuchsanordnung gesehenen Sternfigur, was wohl doch der Fall sein müßte, wenn dieselbe ein Strukturbild darstellte. Dagegen sieht man sie bei der unten beschriebenen objektiven Stigmatoskopie, welche sich dieser Methode nahe anschließt, und bei welcher die physikalischen Bedingungen dafür erfüllt sind, daß durch die erwähnten „Faltenbildungen“ eine Sternfigur sichtbar gemacht werden soll.

Unter den brechenden Flächen des Auges nimmt die vordere Hornhautfläche eine Sonderstellung ein, indem sie nicht nur der Untersuchung mit Spiegelbildern leichter zugänglich ist, sondern auch durch ihre freie Lage die direkte Inspektion zuläßt. Die Menge des gespiegelten Lichtes ist hinreichend, um auch die Spiegelbilder von hellen Gegenständen bequem

sehen zu können, welche vom diffusen Tageslichte oder von gutem artefiziellem Lichte beleuchtet werden, und gestattet sogar bei Beleuchtung der Gegenstände mit elektrischem Bogenlicht von hinreichender Stärke die Photographie der Spiegelbilder mit so kurzer Expositionszeit, daß die Schärfe wenig zu wünschen übrig läßt. Zur Beobachtung eignet sich als einfachstes Instrument das Keratoskop von Placido, welches aus einer im Zentrum durchbohrten Scheibe mit konzentrischen, abwechselnd weißen und schwarzen Ringen besteht. Eine kurze Ansatzröhre in Verbindung mit dem Loche

Fig. 12.

dient zum annähernden Visieren und damit zur Kontrolle, daß die Scheibe senkrecht auf die Gesichtslinie des Beobachters gehalten wird. Indem nun verschiedene Fixationspunkte für das beobachtete Auge bestimmt werden, entstehen die Spiegelbilder an verschiedenen Teilen der Hornhaut, wobei dieselben auch eine verschiedene Gestalt haben. Schon durch diese Beobachtung kann man einen ziemlich guten Überblick über die Form der Hornhaut erhalten. Noch sicherer als die Verunstaltung eines Kreises beurteilt man aber die eines Quadrates. Ich habe deshalb zur photographischen Keratoskopie eine Scheibe angewendet, deren Aussehen aus der Fig. 12 hervorgeht, und auf welcher die Linien so berechnet sind, daß, wenn die Scheibe im richtigen Abstande aufgestellt ist, die vom Zentrum derselben aus gesehenen Spiegelbilder in einer sphärischen Fläche mit einem im Verhältnis zu diesem Abstande hinreichend kleinen Krümmungsradius vier Quadrate darstellen, deren Seitenabstand gleich der Seite des kleinsten

Quadrates ist. Weicht die Form der Fläche von der sphärischen ab, so wird das Spiegelbild entsprechend deformiert, wobei die Abstände der Linien proportional zu den Krümmungsradien der betreffenden Flächenelemente sind. Das Spiegelbild wird zunächst beim Blick gerade ins Objektiv, dann bei vier anderen, durch Fixationsmarken bezeichneten Blickstellungen photographiert, nämlich nach oben und unten sowie nach den beiden Seiten, wobei immer in der peripheren Blickstellung die beiden Punkte der Hornhaut, welche die Mittelpunkte der zwei dem Hornhautzentrum am nächsten liegenden Konturen spiegeln, genau dieselben sind, wo beim Blick ins Objektiv die Mittelpunkte der bezüglichen zwei peripherstenKonturen gespiegelt werden. Die Mittel, mit welchen dies erreicht wird, kommen weiter unten bei der Beschreibung der photographischen Ophthalmometrie zur Besprechung.

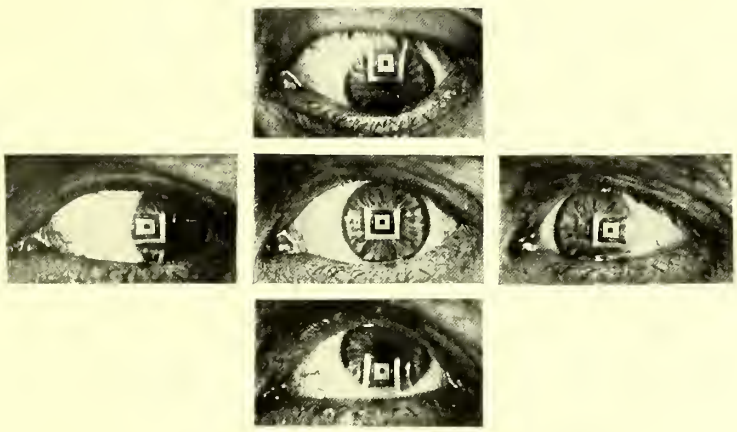


Fig. 13.

Das Aussehen der Spiegelbilder in einer typisch normalen Hornhaut zeigt die Gruppe der Fig. 13. Im zentralen Bilde sieht man die Vierecke vollkommen regelmäßig, obwohl die oberste Linie von den Zilien beschattet und daher nicht zu sehen ist. Das Bild ist ebensoweit vom oberen wie vom unteren Hornhautrande entfernt, dem inneren aber merklich näher als dem äußeren. An der Platte sieht man auch mit der Lupe deutlich, daß die Pupille lateralwärts vom Zentrum des Spiegelbildes steht, obwohl dieses Detail bei der Reproduktion verloren gegangen ist. Die vier in peripherer Blickstellung aufgenommenen Bilder sind in radiärer Richtung ausgedehnt mit nach der Peripherie hin zunehmender Vergrößerung. Die in der oberen und unteren Hornhautpartie gespiegelten Bilder sind in bezug aufeinander annähernd symmetrisch, und es ist an beiden, besonders am unteren, aus den schiefen Winkeln ersichtlich, daß die betreffende Hornhautpartie nicht um die vertikale Mittellinie des Spiegelbildes symmetrisch ist, sondern daß die Linien stärkster Vergrößerung derselben sich auf der zentralen Hornhautpartie in einem lateralwärts vom Zentrum des dort entstandenen Spiegelbildes gelegenen Punkte schneiden. An den beiden horizontalen Bildern tritt eine bedeutende Asymmetrie zutage, indem die Vergrößerung

längs dem horizontalen Hornhautschnitt in nasaler Richtung sowohl stärker ist, wie rapider ansteigt als in der temporalen. Die Beobachtung dieser Spiegelbilder lehrt somit, daß die vordere Hornhautfläche eine zentrale Zone hat, in welcher ihre Form wenig von der einer Sphäre abweicht, während nach der Peripherie hin eine bedeutende Abflachung sich kundgibt, welche in nasaler Richtung am stärksten, in der temporalen am schwächsten ausgeprägt ist, sowie daß nicht weniger der Mittelpunkt dieser zentralen Zone als auch die Mittelpunkte der Hornhautbasis und der Eintrittspupille temporalwärts von der zur Visierlinie parallelen Hornhautnormale gelegen sind.

Zur Beobachtung des an der hinteren Hornhautfläche entstehenden Spiegelbildes braucht man eine kleine Lichtquelle mit hoher spezifischer Lichtstärke. Zwar genügt ein gewöhnliches Glühlämpchen, um die Beobachtbarkeit des Spiegelbildes zu konstatieren, aber zur feineren Untersuchung ist die Abbildung des Fadens derselben in einem Spalte erforderlich, so daß der Spalt meines elektrischen Handaugenspiegels oder der Nernstspaltlampe die besten Resultate ergibt. Beobachtet man bei beliebiger Aufstellung der Nernstspaltlampe mit vertikalem Spalte das Hornhautspiegelbild desselben unter Lupenvergrößerung, indem man zunächst die Blickrichtung des beobachteten Auges mit der eigenen Visierlinie zusammenfallen läßt, so kann man entweder durch Entfernen der Lampe vom eigenen Auge oder durch Drehen des Blickes des Beobachteten in der entgegengesetzten Richtung das Hornhautspiegelbild des Spaltes beliebig dem Hornhautrand nähern und sieht dann bald ein kleines schwaches Spiegelbild demselben nachfolgen. Je näher man dem Hornhautrand kommt, um so mehr vergrößert sich der Abstand der beiden Spiegelbilder voneinander, und es stößt gewöhnlich auf keine Schwierigkeit, das in der vorderen Hornhautfläche entstandene Spiegelbild den Limbus überschreiten zu lassen, so daß nur das in der Hinterfläche entstandene sichtbar bleibt. Mit dem elektrischen Handaugenspiegel macht man denselben Versuch unter Anwendung eines Glases von + 10 dptr — bei Emmetropie des eigenen Auges — und unter Wechselung der Blickrichtung des beobachteten Auges. Man konstatiert, daß die Erscheinung nach allen Richtungen hin unverändert dieselbe bleibt, woraus der Schluß auf die gegen die Peripherie zunehmende Dicke der Hornhaut gezogen werden kann. Aus der scheinbaren Größe der Spiegelbilder darf man aber ohne weiteres keinen Schluß ziehen, da bei so kleinen Bildern die scheinbare Größe durch die Wahrnehmbarkeit der Zerstreuungskreise beeinflußt wird, welche wiederum von der Helligkeit abhängig ist.

Das in der vorderen Linsenfläche entstehende Spiegelbild kann man auch bei kleiner Pupille mit gewöhnlichen Lichtquellen beobachten, wenn man einen etwa 60° betragenden Winkel zwischen der eigenen Visierlinie und der Einfallsrichtung des Lichtes wählt und mit der Fixationsmarke von derjenigen Stellung ausgeht, wo die Blicklinie des beobachteten Auges diesen Winkel halbiert. Man hat dann fast stets die Fixationsmarke um einige Grade nasalwärts und gewöhnlich auch ein wenig nach oben zu verschieben, um das Spiegelbild im Zentrum der Pupille zu sehen. Wenn die Pupille nicht zu eng ist, so braucht man nur bei dieser Versuchsanordnung zwei auf derselben Vertikallinie befindliche Lichtquellen anzuwenden,

um die Veränderung des Spiegelbildes bei der Akkommodation zu beobachten. Wegen der scharfen, hellen Spiegelbilder eignen sich hierzu am besten zwei Nernstspaltlampen, man kann aber auch mit einer auskommen, wenn man das in einem horizontalen Spiegel entstehende Spiegelbild des Spaltes als die zweite Lichtquelle benutzt. Bei diesen Versuchen ist es sehr leicht, zu konstatieren, daß das Spiegelbild bei kleinen ruhigen Bewegungen des Auges manchmal springende Bewegungen ausführt. Man darf aber hieraus nicht etwa den Schluß ziehen, daß die „Faltenbildungen", welche an den Isoindizialflächen der Linse vorhanden sind, auch an der vorderen Fläche konstatiert wären, da man, wie schon hervorgehoben wurde, das an dieser Fläche regelmäßig reflektierte Licht nicht von dem in den obersten Schichten der Linsensubstanz und in der vorderen Diskontinuitätsfläche reflektierten unterscheiden kann. Dies ist aber möglich mit der bei dieser Versuchsanordnung vorgenommenen fokalen Beleuchtung mit Nernstspaltlampe und aplanatischer Linse, bei welcher man ein scharfes Spiegelbild des Spaltes sehen kann, welches, soweit ich finden konnte, nie springende Bewegungen macht. Außerdem hat dieses Spiegelbild dieselbe Farbe wie die übrigen in den brechenden Flächen beobachteten, während das auf gewöhnliche Weise entstehende Spiegelbild der vorderen Linsenfläche auffallend bläulicher ist, ein Beweis dafür, daß es zum größten Teil durch mehrmalige Reflexion an kleinen, regelmäßig angeordneten Teilchen entstanden ist. Mit meinem elektrischen Handaugenspiegel läßt sich das vordere Linsenbild sehr leicht sehen, wenn man bei Emmetropie des eigenen Auges eine positive Korrektionslinse von 10 dptr vorschiebt und einen Abstand von 4 mm zwischen Spalt und Loch anwendet, wobei der Spalt in bezug auf das beobachtete Auge nasalwärts vom Loche stehen soll. Läßt man dann den Spalt fixieren, indem man sich dem beobachteten Auge nähert, bis die Pupille scharf gesehen wird, so sieht man sehr schön die drei klassischen Purkinjeschen Bilder auf dem dunklen Hintergrunde der Pupille, das der vorderen Linsenfläche am meisten nasalwärts und gewöhnlich ein wenig höher liegend als die beiden anderen. Sollte bei abnormen Dezentrationen letzteres Bild vom nasalen Pupillenrand verdeckt sein oder dem Hornhautbild zu nahe liegen, um deutlich gesehen zu werden, so hat man nur den Abstand des Spaltes vom Loche entsprechend zu vergrößern bzw. zu verkleinern.

Das hintere Linsenbild ist hinreichend lichtstark, um bei den verschiedensten Versuchsanordnungen neben dem Hornhautspiegelbild gesehen zu werden. Die einfachste Methode zur Beobachtung desselben ist die mit dem Augenspiegel unter Anwendung einer starken Positivlinse, etwa 20 dptr, welche Kombination auch Lupenspiegel genannt wird. Durch Bewegung der Blicklinie in nasaler Richtung wird das hintere Linsenbild vom Hornhautspiegel getrennt, indem letzteres mehr temporalwärts in der Pupille wandert. Da es ungefähr in der Eintrittspupille liegt, so ist es sehr leicht, den Abstand des Spiegels vom Auge so zu bemessen, daß jedes Detail des Bildes gesehen werden kann. Wendet man als Lichtquelle eine mattierte Glühlampe an, so kann man die Schärfe des Bildes an dem Spiegelbilde des Spiegelloches beurteilen, welches man durch kleine Drehungen des Spiegels auf das Bild der Lichtquelle zentriert. Die in normalen Fällen bis zum mittleren Alter außerordentlich hohe Schärfe dieses Bildes nimmt im

höheren Alter mit der zunehmenden Sklerose des Linsenkernes ab. Wenn hierbei keine Trübung in der Kortikalis die Erscheinung verschleiert, so kann man in vielen Fällen bei ausgeprägter Kernsklerose eine Verdopplung des hinteren Linsenbildes beobachten, indem man in einer den Kernäquator streifenden Richtung das Spiegelbild sieht. Um die richtige Stellung zu finden, geht man am besten von der gewöhnlichen Stellung des Auges bei der Ophthalmoskopie aus, indem man unter stetiger Beobachtung des Spiegelbildes eine Fixationsmarke in nasaler Richtung verschiebt, bis das Bild am nasalen Rande der Pupille verschwindet. Wenn die Verdopplung vorhanden ist, so sieht man in einem gewissen Augenblicke ein neues Bild neben dem beobachteten und peripheriewärts von demselben auftauchen, um bald allein sichtbar zu sein, indem bei Weiterbewegung der Fixationsmarke das zuerst gesehene Bild verschwindet. Dieses Verhalten der Doppelbilder kann nur durch die Diskontinuität erklärt werden, welche bei der normalen Kernsklerose in geringem Grade, unter gewissen pathologischen Verhältnissen aber (bei sogenanntem falschen Lentieonus) äußerst ausgeprägt vorhanden ist und darin besteht, daß der Kern sozusagen als eine in der Linsensubstanz liegende Linse wirkt. Wenn man am Kernäquator vorbeisieht, entsteht dann eine Verdopplung des Bildes von derselben Natur wie an der Kante eines Prismas. Da nun die gewöhnlich an einer Prismenkante gesehenen Doppelbilder gekreuzt sind und nur dann nebeneinander wahrgenommen werden, wenn die Prismenkante dem Auge sehr nahe steht, so würde man vielleicht hierin einen scheinbaren Widerspruch finden, indem der eben beschriebene Versuch ungekreuzte Doppelbilder angibt. Man kann sich aber sehr leicht durch geometrische Konstruktion und noch einfacher durch einen Versuch überzeugen, daß tatsächlich an einer Prismenkante in Verbindung mit einem Konkavspiegel unter Verhältnissen, welche dem beschriebenen Versuche analog sind, ungekreuzte Doppelbilder gesehen werden. Hält man nämlich einen Konkavspiegel von hinreichend großer Öffnung in einem solchen Abstande, daß man das umgekehrte Bild seines Gesichtes sieht, und schiebt man dann vor einen Teil des Konkavspiegels ein Prisma von einigen Graden, so sieht man die Doppelbilder an der Kante desselben, nicht an der Basis, wie es sonst bei alleiniger Anwendung des Prismas der Fall ist. Dieselbe Verdopplung tritt auf ganz ähnliche Weise in vielen jugendlichen Augen während der Akkommodation auf und läßt sich bei kokainisierter Pupille ohne Schwierigkeit beobachten, wenn man, eventuell unter Anwendung einer schwächeren Konvexlinse, dafür sorgt, daß die Fixationsmarke auch dem beobachteten Auge sichtbar ist. Diese zuerst von Zeemann[1]) beobachtete Erscheinung ist fälschlicherweise auf einen Lentieonus posterior bezogen worden, welcher während der Akkommodation entstehen sollte, während die peripheren Teile der hinteren Linsenfläche nach vorn konvex werden sollten. Wie ich aber in einem Falle, wo die Verdopplung des hinteren Linsenbildes beim echten Lentieonus beobachtet worden ist, eingehend beschrieben habe[2]), zeigen die Doppelbilder eine in radiärer Richtung gegen-

1) W. P. C. Zeemann, Über die Form der hinteren Linsenfläche. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLVI. 1908. S. 83.

2) Ett fall af Lenticonus posterior. Nord. Ophth. Tidskr. 1892.

sinnige Bewegung, was nie bei der Akkommodation beobachtet wird. Da überhaupt keine Verunstaltung oder auffallende Vergrößerung des Spiegelbildes in den peripheren Teilen der hinteren Linsenfläche beobachtet werden kann, so kann man durch die einfache Beobachtung desselben konstatieren, sowohl daß keine Lenticonusbildung bei der Akkommodation zustande kommt, wie daß der Akkommodationsakt in vielen Fällen von dem Auftreten der Diskontinuitätsfläche, oder wenn man so will, von einer vorübergehenden Kernbildung in der Linse begleitet ist. Zu sämtlichen Untersuchungen des hinteren Linsenbildes ist mein elektrischer Handaugenspiegel das geeignetste Instrument, weil man mit demselben auf bequemste Weise ein scharfes Bild erhält und das rote Licht des Augenhintergrundes eliminiert.

Zur Beobachtung der von ihm entdeckten Kernbildchen hat Heß[1]) ein Osmiumglühlämpchen empfohlen. Man sucht eine solche Stellung der Lichtquelle aus, daß das Spiegelbild in der vorderen Linsenfläche nahe dem Pupillarrande gesehen wird, und kann dann bei vertikalen Bewegungen der Lichtquelle beobachten, wie es in zwei zerfällt, von denen das dem Mittelpunkt der Pupille näher gelegene die kleineren Exkursionen macht und oberflächlicher liegt. Ebenso sieht man das hintere Linsenbild von einem diffuseren Bild begleitet werden, welches dem Pupillarzentrum näher liegt und geringere vertikale Exkursionen macht. Zu dieser Untersuchung eignet sich auch als Lichtquelle der Spalt des elektrischen Handaugenspiegels, welcher mit der einen Hand geführt wird, während die andere die Lupe hält. Das hintere Kernbildchen sieht man aber am allerbesten bei der Untersuchung des hinteren Linsenbildes, wie oben zur Beobachtung der Verdopplung desselben beschrieben wurde. Indem bei der Drehung der Blicklinie des beobachteten Auges das hintere Linsenbild nach der Peripherie rückt, sieht man ein verwaschenes Bild demselben nachfolgen, um vor Erreichung der Peripherie zunächst größer und verwaschener zu werden, dann allmählich zu verschwinden.

Die letzte brechende Fläche im optischen System des Auges ist die Netzhautoberfläche, obwohl der kurze Abstand derselben von der lichtperzipierenden Schicht ihre Bedeutung für die Abbildung auf die weiter unten zu berücksichtigende Beeinflussung der chromatischen Vergrößerungsdifferenz in der Fovea reduziert. Die Beobachtung der an derselben entstehenden Spiegelbilder, der Netzhautreflexe, welche eingehend von Dimmer[2]) untersucht wurden, erfolgt mit dem Augenspiegel sowohl im aufrechten wie im umgekehrten Bild. Ersichtlicherweise kann nur dort ein Reflex sichtbar sein, wo die Oberflächennormale durch die Pupille geht. Dies ist zunächst im Grunde der Fovea der Fall, wo man im aufrechten Bild je nach den gestaltlichen Verhältnissen des Foveagrundes und der Beschaffenheit des Spiegels (mit oder ohne Loch) einen ringförmigen, punktförmigen oder scheibenähnlichen Reflex findet, aber auch einen hellen Punkt im Zentrum eines Ringes oder zwei Ringe sehen kann. Macht man mit dem

1) C. Heß, Über Linsenbildchen, die durch Spiegelung am Kerne der normalen Linse entstehen. Arch. f. Augenheilk. LI. 1905. S. 375.

2) Friedrich Dimmer. Die ophthalmoskopischen Lichtreflexe der Netzhaut. Leipzig und Wien, 1891.

Spiegel seitliche Bewegungen, so verschieben sich die Schnittpunkte der Pupillarebene mit den Oberflächennormalen in denjenigen Punkten, wo die Netzhaut spiegeln kann, in derselben Richtung. Es folgt hieraus, daß eine gleichsinnige Bewegung des Netzhautreflexes eine konvexe, eine gegensinnige aber eine konkave Oberflächenform angibt. Der kleine, im Fovealgrunde gesehene Reflex zeigt auch stets bei geeigneter Versuchsanordnung eine gegensinnige Bewegung, welche sich zwar oft in Fällen, wo derselbe ringförmig ist und die Pupillengröße nur kleine Exkursionen gestattet, kaum anders kundgibt als dadurch, daß bei der Verschiebung des Spiegels nach der einen Seite der nach der anderen Seite liegende Teil des Ringes gesehen wird und umgekehrt. Eine andere Stelle, wo die Oberflächennormalen der Netzhaut durch die Pupille gehen, ist die wallartige Erhebung um die Fovea. Auf der Höhe derselben sieht man auch in Übereinstimmung hiermit einen größeren ringförmigen Reflex mit dem ungefähren Durchmesser der Papille. Vor der Einführung der stärker gekrümmten Konkavspiegel in die Technik des aufrechten Bildes wurde dieser Reflex gewöhnlich nur im umgekehrten Bilde gesehen. Seitdem man aber mit diesen Spiegeln ein größeres Feld im aufrechten Bild hat, sieht man denselben auch dort sehr gut und konstatiert ohne Schwierigkeit, daß er bei seitlichen Verschiebungen mit dem Spiegel eine ausgiebige gleichsinnige Bewegung hat. Endlich gibt es noch eine dritte Stelle, wo ein Reflexring entstehen muß, obwohl derselbe bisher nicht gesehen wurde. Geht man nämlich auf der Netzhautoberfläche peripheriewärts von der wallartigen Erhebung, so schneidet zunächst die Oberflächennormale den vorderen Teil der Bulbuswand in einem auf derselben Seite der Pupille liegenden Punkt, während in größerer Entfernung von der Fovea die Oberflächennormale approximativ durch den Mittelpunkt des Bulbus geht und demnach mit Notwendigkeit den vorderen Teil der Bulbuswand in einem auf der entgegengesetzten Seite der Pupille liegenden Punkt schneiden muß. Es folgt hieraus, daß in einer gewissen Entfernung von der Fovea die Oberflächennormale der Netzhaut wieder durch die Pupille geht. Sobald die notwendigen Bedingungen zur Beobachtung des an dieser Stelle entstehenden Reflexringes erfüllt wurden, konnte auch derselbe beobachtet werden. Damit ein scharf begrenzter Ring gesehen werden könne, ist es offensichtlich notwendig, daß sowohl im Beleuchtungssystem wie im Beobachtungssystem nur ein kleiner Teil der Pupille des beobachteten Auges angewendet wird, während doch das ophthalmoskopische Feld die entsprechende Größe haben muß. Dies wurde erst durch die oben beschriebenen Methoden der reflexlosen Ophthalmoskopie ermöglicht. Am allerschönsten sieht man bei der vereinfachten reflexlosen Ophthalmoskopie ohne künstliche Pupillenerweiterung den dritten Reflexring mit einem Durchmesser von ungefähr drei Papillenbreiten.

3. Parallaktische Methoden.

Im allgemeinen kann man als Parallaxe die Veränderung des Winkelabstandes zweier gegebener Punkte bezeichnen, wenn derselbe nacheinander in zwei verschiedenen Punkten bestimmt wird. Ist der Winkelabstand sehr klein, so daß die beiden Punkte zur Deckung gebracht oder wenigstens

gleichzeitig scharf gesehen werden können, so entsteht, während man vom einen Standpunkte zum anderen übergeht, eine Scheinverschiebung der beobachteten Gegenstände zueinander, wobei die relative Bewegungsrichtung des entfernteren Gegenstandes dieselbe wie die des Auges, die des näher gelegenen aber die entgegengesetzte ist. Wenn, wie allgemein, eine gleichsinnige Bewegungsrichtung als positives Vorzeichen habend angesehen wird, so gibt die Richtung der relativen Scheinbewegung das Vorzeichen des Projektionskoeffizienten an, wenn mit dem scheinbar bewegten Punkt als Projektionszentrum die vom Auge zurückgelegte Strecke auf eine durch den anderen beobachteten Punkt senkrecht zur Gesichtslinie gelegte Ebene projiziert wird. Hieran wird dadurch, daß sich einer der Punkte oder beide innerhalb eines optischen Systems befindet, weiter nichts geändert, als daß die optische Projektion an Stelle der geradlinigen tritt.

Im Gebiete der Ophthalmoskopie ist zur monokularen Beobachtung von Niveauunterschieden die parallaktische Verschiebung im aufrechten Bild die empfindlichste Methode. Unter der Voraussetzung, daß das Spiegelloch als Eintrittspupille des beobachtenden Auges fungiert, erhält man bei der Verschiebung desselben um die Strecke q in einer zur Achse des Beobachtungssystems senkrechten Richtung auf folgende Weise ein Maß der Parallaxe eines nicht auf dem Augenhintergrund gelegenen Punktes. Zunächst wird die Strecke q mit dem letztgenannten Punkte als Projektionszentrum auf den Augenhintergrund des beobachteten Auges projiziert, wonach diese Projektion auf dem Augenhintergrund des beobachtenden Auges abgebildet wird, zu welchem Zwecke die Winkelgröße ω'_q derselben im Zentrum des Spiegelloches bestimmt werden soll. Die erstgenannte Projektion führt man am einfachsten aus unter Anwendung des vom optischen System des Auges entworfenen Bildes sowohl des Projektionszentrums wie der Schirmebene. Wenn die im Zentrum des Loches gemessene Refraktion des Auges mit R'_q, die dortselbst gemessene Konvergenz des Strahlenbündels des Projektionszentrums mit A'_q bezeichnet wird, so hat man in der Formel (8) S. 15 $K = 1$ zu setzen und für δ' bzw. $\mathfrak{B}$ die Werte $\frac{1}{R'_q}$ bzw. A'_q einzuführen, woraus sich ergibt

$$C = 1 - \frac{A'_q}{R'_q}$$

Wird die Projektion der Strecke q auf dem Luftbild des Augenhintergrundes des beobachteten Auges mit q' bezeichnet, wobei $q' = Cq$ und $q' R'_q = \omega'_q$ ist, so erhält man

$$\omega'_q = q\,(R'_q - A'_q)$$

welche Formel wiederum, wenn der vordere Brennpunkt des beobachteten Auges mit dem Zentrum des Spiegelloches zusammenfällt, durch Anwendung der Brennpunktgleichungen auf die Form

$$\omega'_q = q D^2 \Delta'$$

gebracht wird, wo D, wie gewöhnlich, die Brechkraft des optischen Systems des Auges und Δ' den reduzierten Abstand des betreffenden Punktes vom

Augenhintergrunde bezeichnet. Letzterer Wert ist somit positiv, wenn der Punkt, dessen Parallaxe durch die Formel bestimmt wird, hinter dem Niveau des Augenhintergrundes, beispielsweise in der Exkavation der Papille, gelegen ist.

Bei der parallaktischen Verschiebung im umgekehrten Bilde erteilt man durch seitliche Verschiebung der Ophthalmoskoplinse dem durch dieselbe entworfenen Bilde des Spiegelloches eine ähnliche Bewegung, welche durch den Wert q gemessen wird. Mit den oben angewendeten Bezeichnungen erhält man dann unmittelbar

$$-\omega_m = Kq\,(R'_q - A'_q)$$

wo die Refraktionswerte bei regelrechter Ausführung der Untersuchung in der Eintrittspupille zu messen sind. Da bei Emmetropie des beobachteten Auges im aufrechten Bild $-\omega_m = \omega'_q$ ist, so gibt die Zahl K, welche negativ ist, das Verhältnis der der Parallaxe entsprechenden Netzhautbildgrößen in dem beobachtenden Auge bei den beiden Methoden an, woraus erhellt, daß im umgekehrten Bilde die vor dem Augenhintergrunde des Auges gelegenen Punkte scheinbar eine mit der Verschiebung der Linse gleichsinnige Bewegung machen, und daß sich die Schärfe der parallaktischen Untersuchung in beiden Methoden wie die Vergrößerung verhält.

Auch die bei Verschiebungen der Ophthalmoskoplinse im umgekehrten Bild auftretenden scheinbaren Bewegungen des Augenhintergrundes können auf verschiedene Weise verwertet werden. So hat neulich Gertz[1]) die Verschiebung des Augenhintergrundbildes im Verhältnis zu den in der Linse entstehenden Spiegelbildern zu einer Methode angewendet, mit welcher die Refraktion innerhalb gewisser Grenzen geschätzt wird. Die einfachste Methode besteht in der Projektion des Augenhintergrundbildes auf die Ophthalmoskoplinse selbst, indem diese während der Verschiebung stets senkrecht auf der eigenen Visierlinie gehalten wird und die Verschiebungen der Linse im allgemeinen Falle auch mit Bewegungen des Spiegels kombiniert werden können. Wird auf diese Weise die Achse des Beobachtungssystems um einen beliebigen auf derselben gelegenen Punkt gedreht, und stellt E den Abstand dieses Drehpunktes von dem durch die Ophthalmoskoplinse erzeugten Bilde des Spiegelloches dar, indem dieser Abstand als positiv angesehen wird, wenn der Drehpunkt auf derselben Seite des Spiegellochbildes liegt wie die Ophthalmoskoplinse, so ist der Drehungswinkel gleich $\frac{q}{E}$. Geht man bei der Verschiebung von der Stellung aus, wo die optische Achse des Auges mit der Achse des Beobachtungssystems zusammenfällt, wobei der Schnittpunkt der Netzhaut mit der Augenachse im Zentrum des Bildes gesehen wird, und konstruiert man nach Ausführung der Verschiebung den von diesem Schnittpunkte zum Zentrum des Spiegellochbildes gehenden Strahl — den betreffenden Hauptstrahl — so bildet derselbe nach der

1) H. Gertz, Über Refraktionsbestimmung mittels der Reflexe der Augenspiegellinse. Widmarks Mitt. a. d. Augenklinik d. Carol. Med. Chir. Inst. z. Stockholm, H. 8. 1906. — Ein Apparat zur Schätzung der Refraktion im umgekehrten Augenspiegelbilde. Ebenda. H. 9. 1908.

Brechung im optischen System des Auges den Winkel $q R'_q$ mit der Achse des Auges und folglich auch den Winkel $q\left(\frac{1}{E} + R'_q\right)$ mit der Achse des versehobenen Beobachtungssystems. Für die Winkelgröße der scheinbaren Verschiebung des Augenhintergrundes in der Öffnung der Ophthalmoskoplinse ergibt sich also

$$-\omega_m = -K q\left(\frac{1}{E} + R'_q\right)$$

woraus hervorgeht, daß keine Parallaxe stattfindet, wenn die Refraktion des beobachteten Auges eine solche ist, daß der Drehpunkt des Beobachtungssystems in demselben scharf abgebildet wird, während, je nachdem die Refraktion einen algebraisch größeren oder kleineren Wert hat, eine gleichsinnige bzw. gegensinnige Verschiebung stattfindet, deren Betrag diesem Refraktionsunterschiede proportional ist. Im gewöhnlichen umgekehrten Bilde wird gewöhnlich der Spiegel während der Verschiebung unbeweglich gehalten, wobei man somit unmittelbar erfährt, ob das beobachtete Auge für den Abstand des Spiegels oder für einen kürzeren bzw. einen längeren oder virtuellen Abstand eingestellt ist. Sehr scharf kann man die Scheinbewegung beobachten, wenn man die Versehiebung in vertikaler Richtung ausführt und dafür sorgt, daß die beiden in der Linse entstehenden Spiegelbilder in gleicher Höhe stehen, indem dieselben dann als im horizontalen Durchmesser der Ophthalmoskoplinse festsitzende Marken wirken. Im stationären Ophthalmoskope braucht man nur das Instrument zu heben und zu senken, um die qualitative Refraktionsdiagnose durch die Scheinverschiebung des Bildes zu erhalten, indem hierbei $E = \infty$ ist.

Wenn man zur Ophthalmoskopie im umgekehrten Bilde zunächst die Pupille zum Leuchten gebracht hat und dabei zufälligerweise, bevor man die Ophthalmoskoplinse vorsetzt, ein Detail des Augenhintergrundes, z. B. ein Gefäß sieht, so braucht man nur zusammen mit dem Spiegel seitliche Verschiebungen des Kopfes auszuführen und die Scheinverschiebung des gesehenen Details in der Pupille des beobachteten Auges zu beobachten, um zu erfahren, ob das Auge für einen zwischen demselben und dem Spiegel gelegenen Punkt eingestellt ist oder nicht. Im ersteren Falle sieht man das umgekehrte Bild, und die Scheinverschiebung ist eine gegensinnige, während im letzteren Falle das umgekehrte Verhalten stattfindet.

Auch die Beobachtungsmethode, welche ich unter dem Namen der **objektiven Stigmatoskopie** beschrieben habe, gehört in das Gebiet der parallaktisehen Methoden. An der Nernstspaltlampe wird unmittelbar vor dem Spalte eine Rotationsblende angebracht, welche außer einem Ausschnitte für den Spalt auch 2 Löcher von $^1/_2$ bzw. 1 mm Durchmesser enthält, mit welchen man somit, wenn das Stäbchen der Nernstlampe gut eingestellt ist, einen leuchtenden Punkt von demselben Durchmesser mit der spezifischen Helligkeit des glühenden Stäbchens erhält. Außerdem wird vor dem Spalte in einer Neigung von 45° ein vertikal gestelltes Deckgläschen befestigt, dessen Größe hinreichend ist, um auszuschließen, daß Licht auf die Kanten fällt. Das so gespiegelte Licht wird in das beobachtete Auge in einem

Abstande von 30 bis 50 cm geworfen, während der Beobachter seine Pupille an den Ort des im Deckgläschen entstehenden virtuellen Spiegelbildes des leuchtenden Punktes bringt und von diesem Ausgangspunkte aus seitliche Verschiebungen macht. Wenn das beobachtete Auge bei dieser Versuchsanordnung das Spiegelbild des leuchtenden Punktes scharf fixieren kann, so entsteht dabei ein Bild auf der Netzhaut, welches in bezug auf die diffuse Lichtreflexion binnen gewisser Grenzen als ein punktförmiges angesehen werden kann, und welches somit die Lichtquelle eines Strahlenbündels ausmacht, in dem die Strahlenvereinigung nach den oben S. 27 mitgeteilten Grundsätzen untersucht wird. Besonders im Abstande von 50 cm haben die Querschnitte des Strahlenbündels eine solche Größe, daß die Pupillengröße des Untersuchers vollkommen bedeutungslos ist. Mit $^1/_2$ mm Durchmesser des Loches kann man die Untersuchung gewöhnlich ohne künstliche Pupillenerweiterung im verdunkelten Zimmer vornehmen und sieht dabei, wenn das eigene Auge richtig zentriert ist, im Zentrum der in den meisten Fällen bei dieser Beleuchtung mittelgroßen Pupille einen hell leuchtenden Punkt, um welchen herum manchmal eine Strahlenfigur wahrgenommen werden kann. Dieser wegen der Helligkeit mehr gelblich erscheinende Punkt ist von einer dunkleren und deshalb mehr rötlich aussehenden Zone umgeben, welche wiederum nach außen von einem helleren, gelblicheren Ring umgeben ist. Je nach der Pupillengröße erstreckt sich diese helle, ringförmige Zone bis zum Rand der Pupille oder wird wiederum von einer dunkleren, rötlicheren Zone umgeben. Verschiebt man nun sein Auge z. B. in horizontaler Richtung, so macht der zentrale helle Punkt eine gleichsinnige Bewegung in der Pupille des beobachteten Auges, während die vertikalen Teile der ringförmigen hellen Zone sich in entgegengesetzter Richtung verschieben. Wie aus dem schon Mitgeteilten hervorgeht, wird hierdurch die positive Aberration innerhalb der optischen Zone des Auges bewiesen, wobei es gleichgültig ist, ob die bisweilen nicht so leicht wahrgenommene Verschiebung der betreffenden Teile des hellen Ringes konstatiert werden kann oder nicht. Außerdem wird durch diesen Versuch bewiesen, daß das normale Auge beim scharfen Sehen nicht die Spitze der kaustischen Fläche, sondern einen weiter vorn gelegenen Teil derselben auf die Netzhaut bringt, daß somit bei emmetropischer Refraktion tatsächlich Hypermetropie längs der Achse besteht. Um die Strahlenfigur stets deutlich zu sehen, hat man nur eine größere Lichtstärke anzuwenden, indem das Loch von 1 mm Durchmesser vorgeschoben und nötigenfalls die Pupille künstlich erweitert wird, wobei aber, wenn ein akkommodationslähmendes Mittel zur Verwendung kommt, die Einstellung des beobachteten Auges auf den leuchtenden Punkt durch Vorsetzen von Gläsern bewerkstelligt werden muß. Diese Figur beweist, daß in den verschiedenen radiären Schnitten die Aberration einen verschiedenen Wert hat, wodurch die sogenannten „Faltenbildungen“ auf der Wellenfläche des Strahlenbündels experimentell konstatiert werden. Wenn das beobachtete Auge nicht für den Abstand des leuchtenden Punktes eingestellt ist, so ist die Erscheinung der Aberration wenigstens ohne künstliche Erweiterung der Pupille nicht so leicht zu konstatieren, weil der Lichtfleck auf dem Augenhintergrunde nicht mehr hinreichend klein ist, um praktisch als punktförmig zu wirken. Doch kann man gewöhnlich in dem

hellen Flecke, dessen parallaktische Bewegungen in der Pupille beobachtet werden, ein dunkleres bzw. ein helleres Zentrum wahrnehmen, je nachdem die Refraktion des Auges um ein paar dptr größer oder kleiner ist, als zur scharfen Einstellung erforderlich. Im ersten Falle ist die Parallaxe in der Pupille eine gleichsinnige, im letzteren eine gegensinnige, indem das Verhältnis ganz dasselbe ist, als wenn ein Gefäß auf dem Augenhintergrund sichtbar ist. An Stelle desselben hat man hier einen hellen Fleck, und die Parallaxe entscheidet einfach, ob man das Zerstreuungsbild desselben im aufrechten oder im umgekehrten Bilde sieht.

Ist das beobachtete Auge astigmatisch, so sieht man bei derjenigen Einstellung, bei welcher die Zeichen der Aberration zutage treten, an Stelle des kleinen hellen runden Fleckes eine oblonge Figur bzw. eine helle Linie, deren Längsrichtung mit dem am stärksten brechenden Hauptschnitte des optischen Systems des beobachteten Auges zusammenfällt. Macht man dabei mit dem Auge parallaktische Bewegungen in der auf dieser Richtung senkrechten Ebene, so zeigt die zentrale Figur — wie sonst der helle zentrale Fleck — eine gleichsinnige Parallaxe. In anderen Richtungen aber ist die Erscheinung der Parallaxe komplizierter, wie auch nach der oben S. 33 ff. geschilderten Konstitution solcher Strahlenbündel zu erwarten ist.

Eine ausgesprochene Asymmetrie des im beobachteten Auge gebrochenen Strahlenbündels gibt sich immer bei der objektiven Stigmatoskopie kund, indem es bei geringeren Graden unmöglich ist, eine um das Pupillenzentrum symmetrische Figur bei der Einstellung zu sehen, bei welcher die Erscheinung der Aberration hervortritt, während in höheren Graden ein Teil des helleren Ringes fehlt, und der sonst zentrale helle Fleck nach der betreffenden Seite dezentriert ist. Bei starker vertikaler Asymmetrie vom gewöhnlichsten Typus sieht man öfters oben in der Pupille einen hellen Fleck, unten eine helle halbmondförmige Figur, und bei vertikalen Verschiebungen des eigenen Auges macht ersterer eine gleichsinnige, letzterer eine gegensinnige Bewegung, so daß die beiden hellen Teile der Pupille bei der Verschiebung des eigenen Auges nach unten im Zentrum der Pupille zusammenfließen, bei der Verschiebung nach oben aber auseinandergehen, um am oberen und unteren Pupillenrande zu verschwinden.

Wenn es sich nicht um feinere Untersuchungen handelt, sondern nur darum, die durch die Refraktion des Auges bedingten Phänomene zu beobachten, so hat man kein Loch vor dem Spalte nötig. Weicht die Refraktion des beobachteten Auges erheblich von der optischen Einstellung auf den leuchtenden Punkt ab, so ist die Parallaxe des hellen Scheines in der Pupille äußerst leicht zu beobachten. Sobald aber der Unterschied nur 1 oder $^1/_2$ dptr beträgt, entstehen durch die Aberration auch bei der dieser Lichtstärke entsprechenden Pupillengröße gewisse Schwierigkeiten bei der Beurteilung. Wenn man aber dann sehr schnelle Verschiebungen macht und nur auf den Totaleindruck der Bewegung des Lichtscheines achtgibt, so pflegt man bis auf eine halbe Dioptrie beurteilen zu können, ob das Auge für den hellen Punkt scharf eingestellt ist oder nicht. Ähnliches gilt für die beiden Hauptschnitte eines astigmatischen Auges, wenn der Spalt so gedreht wird, daß das Spiegelbild desselben senkrecht auf dem zu untersuchenden Hauptschnitt steht, und die Verschiebungen des eigenen Auges

senkrecht auf die Längsrichtung des Spaltspiegelbildes stattfinden. Auch zur Auffindung der Hauptschnitte ist das Loch vor dem Spalte bei nicht zu geringen Graden von Astigmatismus überflüssig, denn sobald man nicht die eigene Pupille in einem Hauptschnitte verschiebt, so zeigt sich dies dadurch, daß die Bewegung des Lichtfleckes in der Pupille des beobachteten Auges nicht in derselben Ebene wie die Verschiebung stattfindet.

Für die Fälle, wo man auf angegebene Weise durch Vergrößerung der Lichtquelle und durch schnelle Verschiebung die objektive Stigmatoskopie modifiziert, um die Erscheinung der Aberration zu eliminieren, kann man den Projektionskoeffizienten durch die Gesetze erster Ordnung ermitteln. Man hat dann die Verschiebungsstrecke der eigenen Pupille in die Pupille des beobachteten Auges zu projizieren und das Zentrum des hellen Fleckes auf der Netzhaut des beobachteten Auges als Projektionszentrum zu benutzen. In der Gleichung (8) S. 15 ist dann $K = 1$ und δ' gleich der Entfernung E der Eintrittspupille des beobachteten Auges von der des beobachtenden, während für $\mathfrak{B}$ die in der Eintrittspupille des beobachtenden Auges gemessene Refraktion des beobachteten Auges einzuführen ist. Wird die in der Eintrittspupille des beobachteten Auges gemessene Refraktion desselben mit R′ bezeichnet, so stellt demnach $\frac{R'}{1 + ER'}$ den für $\mathfrak{B}$ einzuführenden Refraktionswert dar, und man erhält

$$C = \frac{1}{1 + ER'}$$

aus welchem Ausdrucke hervorgeht, daß die sichtbare Bewegung des Lichtes in der Pupille des beobachteten Auges um so schneller ist, je weniger die Einstellung desselben von der der Pupille des beobachtenden Auges entsprechenden abweicht. Wenn das beobachtete Auge astigmatisch ist, so ergeben sich auf diese Weise zwei den beiden Werten von R′ entsprechende Werte von C, aus welchen mit den Formeln (10) die Bewegungsrichtung und der die Schnelligkeit der Bewegung angebende lineare Projektionskoeffizient erhalten werden.

Es ist einleuchtend, daß man die zur Eliminierung der Aberrationsphänomene modifizierte objektive Stigmatoskopie auch so ausführen kann, daß durch Drehung des durchsichtigen Spiegels das Spiegelbild des Spaltes verschoben wird, während man sein Auge ruhig hält, sowie daß es nicht nötig ist, daß der Spalt durch den Spiegel in der Ebene der Eintrittspupille des beobachtenden Auges abgebildet wird, sondern daß im Gegenteil die Aberrationsphänomene leichter zum Verschwinden gebracht werden können, wenn bei der Einstellung des beobachteten Auges auf die Pupille des beobachtenden ein unscharfes Bild des Spaltes auf dem Augenhintergrund des ersteren Auges liegt. Die modifizierte Methode ist somit wesentlich nichts anderes als eine **Skiaskopie mit durchsichtigem Spiegel**, erfordert aber als solche die spezifische Helligkeit des Nernstspaltes und unterscheidet sich von der gewöhnlichen **Skiaskopie mit durchbohrtem Spiegel** wesentlich dadurch, daß sie die Refraktion in der Fovea centralis ergibt, welche mit letzterer Methode nicht erhalten werden kann. Die Ermittlung des Projektionskoeffizienten findet auf analoge Weise wie

oben statt, indem die Verschiebungsstrecke des Lichtfleckes auf der Netzhaut des beobachteten Auges in die Eintrittspupille desselben mit der Eintrittspupille des beobachtenden Auges als Projektionszentrum projiziert wird. Führt man dabei an Stelle der Verschiebungsstrecke die dem beobachteten Auge scheinbare Winkelbewegung des durch den Spiegel entworfenen Lichtquellenbildes und an Stelle der linearen Bewegung des Lichtscheines in der Pupille des beobachteten Auge die in der Eintrittspupille des beobachtenden Auges gemessene Winkelbewegung ein, so erhält man obenstehende Formel, in welcher C dann das Verhältnis der letzteren Winkelbewegung zur ersteren angibt, wie es auch a priori postuliert werden kann. Ein positives Vorzeichen gibt dabei eine gleichsinnige Winkelbewegung an, und da beim durchsichtigen Planspiegel die im Beobachterauge gemessene Winkelbewegung des durch den Spiegel auf das Gesicht des Beobachteten geworfenen Lichtfleckes mit der im beobachteten Auge gemessenen Winkelbewegung des vom Spiegel entworfenen Lichtquellenbildes gleichsinnig ist, so gibt beim Planspiegel ein positives Vorzeichen von C an, daß sich der in der Pupille des beobachteten Auges sichtbare Liehtsehein bei der Drehung des Spiegels in derselben Richtung bewegt wie der auf dem Gesicht entstehende Lichtfleck. In der gewöhnlichen Skiaskopie mit durchbohrtem Spiegel gilt, wie eine einfache Überlegung lehrt, dieselbe Regel für alle Spiegel, welche ein Bild der Lichtquelle entweder hinter dem beobachtenden oder hinter dem beobachteten Auge entwerfen, während die umgekehrte Regel gültig ist, sobald das vom Spiegel erzeugte Bild der Lichtquelle zwischen beiden Augen gelegen ist. Auf jeden Fall soll ein Konkavspiegel von solcher Brennweite, daß das Lichtquellenbild unweit des beobachteten Auges liegt, vermieden werden, weil dabei die skiaskopische Erscheinung undeutlich wird.

Da bei der Herleitung obenstehender Formel nur die Gesetze erster Ordnung angewendet worden sind, so ist es einleuchtend, daß dieselbe nicht in den Fällen Anwendung finden kann, wo die Aberration einwirkt, was, je größer die Pupille des beobachteten Auges, einem um so größeren neutralen Gebiet entspricht, wo man nur weiß, daß die optische Einstellung des beobachteten Auges einem in der Nähe der Beobachterpupille gelegenen Punkte entspricht, aber nicht entscheiden kann, ob dieser Punkt vor oder hinter derselben gelegen ist. Man hat zwar eine große Mühe darauf verwendet, dieses neutrale Gebiet mit der gewöhnlichen Skiaskopie näher zu untersuehen. Hierbei ist man aber von dem Gedanken ausgegangen, daß der bei der Bewegung des Lichtscheines in der Pupille von der einen oder anderen Seite kommende Schatten das Wesentliche wäre, und hat u. a. darüber gestritten, ob der Schatten von der Iris des beobachtenden Auges oder von der des beobachteten herrühre. Gewöhnlich ist auch die Bedeutung des Spiegelloches für das Beleuchtungssystem unbekannt geblieben. Nur bei Wolff[1]) wird die durch die Nichterfüllung der ophthalmoskopischen Bedingung der Lochgröße bedingte Erscheinung gebührend gewürdigt.

Wenn bei der gewöhnlichen Skiaskopie mit durchbohrtem Spiegel die Pupille des beobachteten Auges hinreichend groß ist und die Abweichung der Einstellung desselben von der dem neutralen Gebiete entsprechenden

1) H. Wolff, Über die Skiaskopietheorie. Berlin 1903.

ausreicht, um die ophthalmoskopische Bedingung der Lochgröße zu erfüllen, so kann mit hinreichender Genauigkeit der nützliche Strahlenraum des Beobachtungssystems konstruiert werden, indem die beiden Pupillen und der Umriß des Lichtfleckes auf dem Luftbilde des Augenhintergrundes als Öffnungen des Systems behandelt werden. Wenn aber die Einstellung des beobachteten Auges wenig von derjenigen abweicht, bei welcher die Pupille des beobachtenden Auges von demselben scharf gesehen wird, so ist die Bedingung der Lochgröße nicht mehr erfüllt, sondern es entsteht ein Vollschatten auf demjenigen Teile des Augenhintergrundes des beobachteten Auges, von welchem das zur Beobachtung dienende Licht eigentlich ausgehen sollte. Zur Berechnung dieses Vollschattens und der übrigen Erscheinungen müßte unbedingt die Aberration mit hinzugezogen werden. Da hierzu kommt, daß der Vollschatten bei Drehung des Spiegels, auch wenn die Aberration nicht im Spiele wäre, nicht unbeweglich sein würde, wenn nicht die Drehungsachse genau durch das Zentrum des Loches ginge, und daß diese Bewegung weiter durch die Aberration kompliziert wird, so ist es einleuchtend, daß die gewöhnliche Skiaskopie nur bei ziemlich großer Pupille anwendbare Approximativwerte geben kann. Man hilft sich in der Praxis gewöhnlich damit aus, daß man nicht die Refraktion in der Fovea centralis, sondern in einem naheliegenden Punkte untersucht. Die bei erweiterter Pupille auftretenden Erscheinungen der Aberration sind auch wegen des Einflusses des Spiegelloches nicht vollkommen eindeutig.

Während sich somit die gewöhnliche Skiaskopie nicht zu genaueren Untersuchungen eignet, ist die verfeinerte Methode von Wolff, bei welcher ein Glühlämpchen die Lichtquelle darstellt, nicht ganz eindeutig im neutralen Gebiete, weil auch die Bedingung des Lichtquellenbildes nicht erfüllt ist, so daß auf der Netzhaut des beobachteten Auges ein mit der Spiegeldrehung bewegter Vollschatten des Loches vorhanden ist, dessen Bewegung unabhängig ist von der Bewegung des durch die Nichterfüllung der Bedingung der Lochgröße entstehenden Schattens. Es folgt hieraus, daß zur Untersuchung der Aberrationserscheinungen nur die objektive Stigmatoskopie, zur möglichst exakten Ermittlung der Refraktion nur die Skiaskopie mit durchsichtigem Spiegel und Nernstspaltlampe angewendet werden soll.

Eine skiaskopische Methode, welche in bezug auf Exaktheit der Resultate der letztgenannten sehr nahe kommt, und mit welcher meistens auch die Refraktion im Zentrum der Fovea centralis untersucht werden kann, erhält man mit meinem oben beschriebenen elektrischen Handaugenspiegel, wenn man den Spalt vorschiebt, bis derselbe einen Teil des Loches verdeckt, und bei der Beobachtung darauf achtgibt, daß die eigene Pupille zum Teil vom vorgeschobenen Beleuchtungsrohr verdeckt wird. Man sieht dann die eine oder andere Seite der Pupille heller, je nachdem das beobachtete Auge für einen zwischen den beiden Augen gelegenen Punkt eingestellt ist oder nicht. Durch Drehen des Beleuchtungsrohres um die Achse des Beobachtungssystems kann man den heller erscheinenden Teil in die temporale Pupillenhälfte verlegen, wo der Unterschied wegen des größeren Abstandes des Hornhautspiegelbildes leichter wahrgenommen wird. Zur Beobachtung der Refraktion in der Fovea centralis bei kleiner Pupille hat man zunächst das

andere Auge fortwährend vor Lichteinfall zu schützen. Wenn man dann einen Augenblick die Hand vor das beobachtete Auge hält, und dieselbe schnell wegnimmt, während der Beobachtete die Blickrichtung möglichst unverändert beibehält, so hat man genügende Zeit, die Erscheinung zu beobachten, bevor die Pupille sich wieder kontrahiert hat. Manchmal ist es auch hinreichend, den Spiegel für einen Augenblick zu drehen, so daß kein Licht ins Auge fällt, während der Spalt doch hinreichend hell ist, um fixiert werden zu können.

Die Parallaxe der in den brechenden Flächen entstehenden Spiegelbilder kann bei zwei verschiedenen Versuchsanordnungen mit Vorteil ausgenutzt werden. Bei der ersten verschiebt man das eigene Auge, während das beobachtete Auge und die Lichtquelle unbeweglich bleiben. Der scheinbare Ort des Spiegelbildes ist dann die betreffende Schale der kaustischen Fläche des beobachteten katadioptrischen Systems. Wenn es sich um die zentrale Partie der Hornhaut handelt, welche bei dieser Untersuchung als sphärisch angesehen werden kann, so ist bei einer Verschiebung in sagittaler Richtung der Ort des Spiegelbildes durch den Schnittpunkt der Visierlinie des beobachtenden Auges mit der von der Lichtquelle zum Krümmungszentrum der Hornhaut gezogenen Linie bestimmt, während bei einer tangentialen Verschiebungsrichtung das Spiegelbild längs der Schnittlinie der ersten kaustischen Fläche mit der Tangentialebene gleitet, der scheinbare Ort desselben sich somit bei der Verschiebung auf ähnliche Weise ändert, wie die scheinbare Grenzlinie einer auf der Verschiebungsrichtung senkrecht stehenden Zylinderfläche. Bei beiden Verschiebungen fällt der scheinbare Ort des Spiegelbildes mit dem des gleichnamigen Bildpunktes zusammen. Letztere Regel ist allgemeingültig, aber, sobald das Licht in einem exzentrischen Teile der Hornhaut oder nach Brechung in derselben in einer anderen Fläche gespiegelt wird, kann man den Ort des zweiten Bildpunktes nicht mehr durch die angegebene einfache Konstruktion ermitteln. Je kleiner der Einfallswinkel, um so mehr nähern sich die beiden kaustischen Flächen einander, und man kann deshalb in einem zentrierten Umdrehungssystem, auf dessen Achse die Lichtquelle in sehr großer Entfernung gelegen ist, den parallaktischen Ort der Spiegelbilder mit hinreichender Genauigkeit als mit den Brennpunkten der katadioptrischen Systeme zusammenfallend ansehen, wenn das beobachtende Auge sehr wenig von der Achse entfernt ist. Durch diese Parallaxe, welche übrigens auch in gewöhnlichen optischen Instrumenten beobachtet wird, wenn die Einstellung auf einem Fadenkreuz nicht scharf ist, kann man ohne Schwierigkeit konstatieren, daß der katoptrische Brennpunkt der Hornhaut hinter der Ebene der Eintrittspupille gelegen ist. Es genügt dazu die Beobachtung, daß das Hornhautspiegelbild einer vom beobachteten Auge fixierten Lichtquelle eine gleichsinnige parallaktische Bewegung in der Pupille zeigt, denn die oben reproduzierten Photographien lehren, daß bei diesem Versuche, besonders wenn das beobachtende Auge sich temporalwärts von der Einfallsrichtung des Lichtes verschiebt, der zur Spiegelung verwendete Teil der Hornhaut der zentralen, angenähert sphärischen Partie derselben angehört.

Bei der zweiten Versuchsanordnung läßt man das beobachtete Auge Bewegungen ausführen, während die Lichtquelle auf der Visierlinie des beobachtenden Auges gelegen ist. Der parallaktische Ort des Spiegelbildes ist dann der scheinbare Ort des Krümmungsmittelpunktes der spiegelnden Fläche in dem bei der Spiegelung angewendeten Punkte und fällt somit nicht mit dem Orte des optischen Bildes zusammen. Da nämlich das einfallende und zurückgeworfene Licht denselben Weg hat, so muß es in dem Punkte, wo es die spiegelnde Fläche trifft, die Richtung der Normale derselben haben. Wenn also die spiegelnde Fläche sphärisch wäre und der vor derselben liegende Teil des optischen Systems den Krümmungsmittelpunkt aplanatisch abbildete, so würde bei den Bewegungen des beobachteten Auges das Spiegelbild stets auf der vom beobachtenden Auge zum aplanatischen Bildpunkte gezogenen Linie gesehen werden. Da nun aber dieser Fall, obwohl physikalisch realisierbar, nicht im optischen System des Auges vorliegt, so weicht das tatsächliche Verhalten insofern hiervon ab, als die vom beobachtenden Auge zum Spiegelbilde gezogene Linie das optische Bild der Krümmungsmittelpunktfläche der spiegelnden Fläche berührt, so daß der parallaktische Ort des Spiegelbildes in der Tat eine ähnliche Verschiebung auf der Visierlinie des beobachtenden Auges erfährt wie in der oben beschriebenen Versuchsanordnung bei tangentialen Verschiebungen des eigenen Auges. Je kleiner aber die vom beobachteten Auge ausgeführten Bewegungen sind, und je näher der Berührungspunkt der Visierlinie des beobachtenden Auges mit der kaustischen Fläche des betreffenden Normalenbündels der Spitze derselben liegt, mit um so geringerem Fehler kann man an Stelle derselben den Krümmungsmittelpunkt auf der Achse setzen. Wäre das optische System des Auges ein zentriertes Umdrehungssystem, so würde die Spitze der kaustischen Fläche des betreffenden Normalenbündels immer auf der Achse gelegen sein. Da nun dies nicht der Fall ist, sondern eine Augenachse willkürlich gewählt werden muß, welche annähernd die Bedingungen einer optischen Achse erfüllt, so ist es einleuchtend, daß ziemlich bedeutende Abweichungen von der Zentrierung der Spitzen der kaustischen Flächen auf der Achse vorkommen können. Die Methode ist deshalb zwar ausgezeichnet, wenn es sich um approximative Werte handelt, und wird in der Ophthalmologie mit Vorteil zur Lokalisation von Trübungen der Medien benutzt, kann aber nicht ohne weiteres als für ophthalmometrische Zwecke hinreichend genau angesehen werden. Doch kann man mit derselben in Fällen mit umschriebenen Trübungen im hinteren Linsenpol konstatieren, daß der Krümmungsmittelpunkt der zentralen Hornhautpartie hinter dem scheinbaren Orte des hinteren Linsenpoles gelegen ist. Man wirft mit dem Augenspiegel Licht in die Pupille und sieht auf dem roten Hintergrund die dunkle Trübung neben dem Hornhautreflex, welcher bei Hebung und Senkung der Blicklinie des beobachteten Auges eine gegensinnige Bewegung im Verhältnis zur Trübung auszuführen scheint. Dieselbe kommt ersichtlicherweise einer gleichsinnigen Parallaxe gleich, wenn das beobachtende Auge mit dem Spiegel bewegt würde.

Wenn der Abstand des beobachtenden Auges und der Lichtquelle vom beobachteten Auge hinreichend groß ist, so hat man bei dieser Beobachtung der Parallaxe nicht nötig, die Lichtquelle auf der Visierlinie des beobach-

tenden Auges aufzustellen, indem der durch den Winkel zwischen Einfallsrichtung des Lichtes und Visierlinie des beobachtenden Auges entstehende Fehler verschwindend gemacht werden kann. Der parallaktische Ort der Spiegelbilder ist bei dieser Variante der Versuchsanordnung nicht auf den optischen Bildern der Krümmungsmittelpunktflächen, sondern neben diesen Bildern in derselben Tiefe gelegen.

Eine Variante der zuerst angeführten parallaktischen Methode ist die stereoskopische Beobachtung der Spiegelbilder. Mit einer beliebigen binokularen Lupe sieht man, wenn der Spalt des zum elektrischen Handaugenspiegel angewendeten Beleuchtungsrohres nahe der Symmetrieachse des Instumentes gehalten wird, wie das erste und dritte katadioptrische Bild hinter der Ebene der Eintrittspupille, letzteres hinter ersterem, gelegen sind. Bei geeigneter Lage des Spaltes sieht man auch das zweite katadioptrische Bild, welches aber so tief liegt, daß man gewöhnlich mit den gebräuchlichen Binokularlupen die beiden Bilder nicht stereoskopisch verschmelzen kann. Mit dem von mir abgeänderten stereoskopischen Augenspiegel von Giraud-Teulon in Kombination mit einer Positivlinse von 8 dptr ist der stereoskopische Effekt hinreichend gering, um bei der Anwendung als Binokularlupe auch das zweite katadioptrische Bild stereoskopisch zu sehen, und auf der anderen Seite hinreichend groß, um auf jedem Fall die Lage der beiden anderen Spiegelbilder hinter der Ebene der Eintrittspupille, in den meisten Fällen auch die Lage des dritten katadioptrischen Bildes hinter dem ersten konstatieren zu können. Wie aus dem Obenstehenden erhellt, sieht man hierbei die Spiegelbilder annähernd in den Fokalebenen der drei katadioptrischen Systeme liegen.

Zur **Beobachtung der Zentrierung des Auges** werden Methoden angewendet, welche den eben erörterten nahe stehen und deshalb am besten hier Platz finden. Schon die Beobachtung des Hornhautspiegelbildes in der Pupille, wenn dieselbe mit dem Augenspiegel zum Leuchten gebracht wird und das beobachtete Auge das Spiegelloch fixiert, lehrt, daß die zentrale Zone der Hornhaut nicht auf der Visierlinie zentriert ist, sondern daß der Krümmungsmittelpunkt derselben in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle nasal und gewöhnlich auch etwas nach oben von dieser Linie gelegen ist. Man kann nun zur näheren Untersuchung dieser Dezentration auf zweierlei Weise das Hornhautspiegelbild in der Pupille zentrieren, indem man nämlich entweder dem beobachteten Auge eine Fixationsmarke gibt, deren richtige Stellung versuchsweise ermittelt wird, oder aber das beobachtende Auge als Fixationsobjekt benutzt, während die Lichtquelle ohne Anwendung des Spiegels passend aufgestellt wird. Ist auf erstere Weise das Hornhautspiegelbild zentriert, so fällt die Visierlinie des beobachtenden Auges mit der durch das Zentrum der Pupille gehenden Hornhautnormale zusammen, und die Orientierung der letzteren zur Visierlinie des beobachteten Auges ist somit bekannt. Bei der Zentrierung des Hornhautspiegelbildes auf letztere Weise ist die Ebene, welche die Einfallsrichtung des Lichtes und die Visierlinie enthält, die Einfallsebene der letzteren, und der zwischen beiden Linien eingeschlossene Winkel ist der doppelte Reflexionswinkel, somit auch der doppelte Einfallswinkel der Visierlinie, weil das Hornhautspiegelbild in der Richtung der Visierlinie des beobachteten Auges gesehen wird.

Wenn somit die Visierlinie keine optische Achse des brechenden Systems des Auges darstellt, so kann man sich des weiteren durch den von Helmholtz angegebenen Versuch davon überzeugen, daß dieses System tatsächlich keine Umdrehungsachse besitzt. Stellt man nämlich eine Lichtquelle und ein Fernrohr in gleichem Abstande vom beobachteten Auge und mit hinreichend großem Winkelabstande auf, um bei geeigneter Blickrichtung des beobachteten Auges die drei Spiegelbilder bequem auf einmal sehen zu können, so würde man, wenn eine Umdrehungsachse vorhanden wäre, durch Verschiebung einer Fixationsmarke dem beobachteten Auge eine solche Stellung geben können, daß diese Achse die von der Lichtquelle zum Fernrohrobjektiv gezogene Linie im Mittelpunkte derselben schnitte, was sich dadurch kundgeben müßte, daß beim Vertauschen des Platzes der Lichtquelle und des Fernrohrobjektives eine symmetrische Anordnung der drei in einer Linie liegenden Spiegelbilder in umgekehrter Reihenfolge gesehen würde. Da dies nie der Fall ist, so ist auch eine wirkliche Umdrehungsachse nie vorhanden. Dasselbe beweist der Versuch von Tscherning[1]), welcher am besten mit Nernstspaltlampen ausgeführt wird. Stellt man zwei solche Lampen mit den beiden Spalten in einer vertikalen Linie auf, in deren Mittelpunkt das Fernrohrobjektiv sich befindet, so sieht man bei dilatierter Pupille, wenn das Fernrohrobjektiv vom beobachteten Auge fixiert wird, die zwei in der vorderen Linsenfläche entstehenden Bilder in nasaler, die der hinteren Linsenfläche angehörigen in temporaler Richtung von den Hornhautspiegelbildern gelegen. Wird dann mit einer Fixationsmarke die Blickrichtung des beobachteten Auges in nasaler Richtung gedreht, so kommen in den meisten Fällen zunächst die Spiegelbilder der hinteren Linsenfläche in dieselbe Linie wie die Hornhautspiegelbilder, dann in dieselbe Linie wie die Spiegelbilder der vorderen Linsenfläche, und schließlich kommen diese in dieselbe Linie wie die Hornhautspiegelbilder. Hätte das optische System des Auges eine vertikale Symmetrieebene, so würden in derselben alle sechs Spiegelbilder in einer Vertikalebene liegen. Wenn dieser Versuch bei so kleinen Einfallswinkeln ausgeführt werden könnte, daß auch bei der Entstehung des zweiten katadioptrischen Bildes die in Betracht kommenden Teile der Hornhaut als der zentralen, annähernd sphärisch gekrümmten Partie derselben angehörend und die Linsenflächen als sphärisch betrachtet werden könnten, so würde derselbe auch beweisen, daß die Krümmungsmittelpunkte der drei Flächen nicht auf einer Linie angeordnet seien, sondern daß der Krümmungsmittelpunkt der zentralen Hornhautpartie temporal von der die Krümmungsmittelpunkte der Linsenflächen verbindenden Linie gelegen wäre. Da nun aber weder das eine noch das andere der Fall ist, so bleibt es bis auf weiteres unbekannt, ob eine den drei Flächen gemeinsame Normale existiert oder nicht, welche dann als Achse anzusehen wäre. Aus bisher bekannten Untersuchungen geht aber hervor, daß die durch das Zentrum der mittelgroßen Pupille gehende Hornhautnormale, deren Lage auf oben angegebene Weise leicht ermittelt wird, im allgemeinen so nahe mit einer solchen Achse zusammenfällt, daß ein abweichendes Verhalten in

1) Beiträge zur Dioptrik des Auges. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane. III. 1892. S. 429 und an anderen Stellen.

den meisten Fällen nicht einwandfrei bewiesen werden kann, weshalb ich dieselbe auch als optische Achse des Auges bezeichnet habe.

Oben wurde beschrieben, wie man mit dem elektrischen Handaugenspiegel das zweite katadioptrische Bild sichtbar machen kann. Bei richtigem Abstande des Spaltes vom Spiegelloch sieht man bei diesem Versuch dasselbe nasal, das dritte katadioptrische Bild temporal vom Hornhautspiegelbilde liegen, wobei fast stets ersteres Bild oberhalb der die beiden letzteren verbindenden Linie gelegen ist. Dreht man aber die Beleuchtungsröhre um das Spiegelloch, während der Spalt fortwährend fixiert wird, so kann man die Spiegelbilder in eine Linie bringen. Wenn dies zutrifft, sieht man gewöhnlich diese Linie den Mittelpunkt der Pupille schneiden, und die Reflexionsebene weicht im allgemeinen bei nicht zu kleinem Einfallswinkel der Visierlinie unbedeutend von der Einfallsebene derselben ab, in welcher auch die optische Achse zu finden ist. Man kann deshalb in den als typisch anzusehenden regelmäßigsten Fällen von einer Symmetrieebene des Auges reden, in welcher die optische Achse und die Visierlinie gelegen sind, und welche folglich auch die Einfallsebene der letzteren darstellt. Es darf aber hierbei kein höherer Anspruch an diese Symmetrieebene gestellt werden, als daß dieselbe einen den drei Flächen gemeinsamen Normalschnitt darstellt, welcher in bezug auf die zentralen Partien der brechenden Flächen als eine Symmetriebeene gelten kann.

III. Entoptische Beobachtungsmethoden.

1. Methoden zur Beobachtung der Strahlenvereinigung.

Wenn im vorhergehenden als objektive Beobachtungsmethoden die zur Beobachtung am Auge eines anderen Menschen dienenden Methoden behandelt worden sind, so sollen jetzt diejenigen Methoden an die Reihe kommen, mit welchen Beobachtungen an den eigenen Augen angestellt werden können. Von solchen Methoden gibt es eine Anzahl, wie die autophthalmoskopischen, die autophthalmometrischen, welche Modifikationen von Methoden darstellen, die zur Beobachtung an den Augen eines anderen Individuums dienen, und welche in dieser kurzen Zusammenstellung um so eher beiseite gelassen werden können, als die Bedeutung derselben für die Dioptrik des Auges wohl keine wesentliche sein kann. Es soll deshalb die Darstellung hier auf solche Methoden beschränkt werden, welche der Beobachter nur auf sein eigenes Auge anwenden kann. Unter diesen steht die entoptische Untersuchung der Strahlenvereinigung im Auge in der Bedeutung für die Dioptrik desselben obenan.

Unter den **Kriterien der scharfen optischen Einstellung** des Auges für ein beobachtetes Objekt kann in vielen Fällen der subjektive Eindruck des scharfen Sehens bei geübten Beobachtern ein zuverlässiges Mittel darstellen. Wäre das im Auge gebrochene Strahlenbündel homozentrisch, so würde wohl dieses Mittel im allgemeinen hinreichend sein. Da nun aber Zerstreuungsfiguren auf der Netzhaut bei jeder Einstellung des optischen Apparates vorhanden sind, so wird der subjektive Eindruck in ziemlich hohem

Grade von der Pupillengröße beeinflußt, so daß sehr oft, besonders bei wenig geübten Beobachtern, der Eindruck einer schärferen optischen Einstellung bei der von einer Verengerung der Pupille begleiteten Akkommodation entsteht, obwohl eine genaue Ermittelung der Sehschärfe das Resultat ergibt, daß die Einstellung des Auges nicht durch die Akkomodation verbessert worden ist. Dies beruht darauf, daß bei der Abbildung die Zerstreuungsfiguren von untergeordneter, die Schnitte der Netzhaut mit den kaustischen Flächen aber von wesentlicher Bedeutung sind. Bei erheblicherer Veränderung der Pupillengröße werden auch diese Schnitte beeinflußt, und man findet auch, daß bei maximaler Erweiterung einer sonst normalen Pupille sowohl der subjektive Eindruck der Schärfe des Sehens wie die nachweisbare Sehschärfe wesentlich schlechter werden. Da auf der anderen Seite eine wirkliche optische Abbildung unter Anwendung verschiedener Schnitte der kaustischen Flächen zustande kommt, so besteht immer eine gewisse Tiefe der optischen Abbildung, welche bei Verengerung der Pupille zunimmt, und welche die Zuverlässigkeit der Sehschärfe als ein Kriterium der optischen Einstellung in um so höherem Grade beeinträchtigt, je mehr das Sehorgan in der Deutung der durch die verschiedenen Querschnitte der kaustischen Flächen erzeugten Bilder geübt ist. Von dem Einflusse dieser Übung kann man sich sehr leicht überzeugen, wenn man z. B. die Sehschärfe eines bisher unkorrigierten Myopen mit 1 bis $1\frac{1}{2}$ dptr Myopie mit der eines Emmetropen vergleicht, dem man durch Konvexgläser dieselbe Myopie artefiziell erteilt. Wenn in beiden Fällen die Sehschärfe innerhalb des Akkommodationsgebietes die gleiche ist, so übertrifft diejenige des Myopen die des Emmetropen bedeutend, sobald die Probetafel im Abstande von einigen Metern aufgehängt wird. Wird aber der sich somit in verschiedener Richtung geltend machende Einfluß der Pupillengröße und der Übung gebührend berücksichtigt, so hat man jedenfalls darin ein sehr brauchbares Kriterium der scharfen optischen Einstellung des Auges, daß die maximale Sehschärfe desselben nachgewiesen werden kann, und bei geübten Beobachtern darf man binnen gewisser Grenzen den subjektiven Eindruck des scharfen Sehens mit einem solchen Nachweise indentifizieren.

Aus dem Gesagten geht es hervor, daß die Untersuchung der Zerstreuungskreise unter Anwendung der Gesetze erster Ordnung der optischen Projektion nur dann einen Sinn haben kann, wenn die optische Einstellung des Auges in solchem Grade von der zum scharfen Sehen erforderlichen abweicht, daß kein Querschnitt der kaustischen Fläche auf die Netzhaut fällt, und wenn die Pupille nicht zu groß ist. Die Theorie dieser Untersuchung ist in den S. 17 deduzierten Formeln (12) enthalten, welche am bequemsten in der Form

$$C_p = \frac{K}{R}(R - A), \qquad C_o = K\frac{A}{R}$$

angewendet werden. Es sei daran erinnert, daß R die in der Eintrittspupille gemessene Refraktion des Auges, A die dortselbst gemessene Konvergenz des Objektstrahlenbündels und K den Vergrößerungskoeffizienten bei der scharfen Abbildung auf der Netzhaut darstellt, wenn ein Strahlenbündel mit der Konvergenz R in das Auge einfällt. Die Formeln ergeben die linearen

Projektionskoeffizienten C_p bzw. C_o für die Projektion der Eintrittspupille auf die Netzhaut mit dem Objekte als Projektionszentrum bzw. für die Projektion des Objektes auf die Netzhaut mit der Pupille als Projektionszentrum, wobei es gleichgültig ist, ob die anatomische Pupille des Auges oder eine beliebige Blende als Pupille funktioniert. Da K stets das Vorzeichen der Hauptpunktrefraktion hat, so ist $\frac{K}{R}$ positiv, wofern das Auge nicht für einen zwischen demselben und der Blende gelegenen Punkt eingestellt ist. Das Vorzeichen von C_p wird dann nur von dem der Differenz $R - A$ bestimmt und ist positiv oder negativ, je nachdem das Objekt hinter oder vor der Netzhaut abgebildet wird. In dem Versuche von Scheiner bestimmt man experimentell dieses Vorzeichen, indem vor das Auge eine Platte gehalten wird, in welche zwei kleine Löcher in so kurzem Abstande voneinander gebohrt sind, daß die Projektion derselben innerhalb des Umfanges der Eintrittspupille gelegen sein kann. Das Kriterium der scharfen Einstellung des Auges für das Objekt ist $C_p = 0$, wobei keine Diplopie vorhanden ist. Wenn aber der Projektionskoeffizient einen endlichen Wert hat, so entstehen bei hinreichend kleinen Löchern und hinreichend großem Abstande derselben voneinander zwei unscharfe Bilder, deren Lage auf der Netzhaut eine gleichseitige oder ungleichseitige ist, und welche somit ungleichseitig bzw. gleichseitig gesehen werden, je nachdem das Vorzeichen des Projektionskoeffizienten positiv oder negativ ist. Dies ergibt sich, indem das eine oder andere Loch verdeckt wird. Ersichtlicherweise würde man mit dieser Methode den Schnittpunkt zweier Strahlen finden können, wenn die Löcher unendlich klein wären, und dieser Schnittpunkt würde der Spitze der kaustischen Fläche um so näher liegen, je kleiner der gegenseitige Abstand der Löcher wäre, wobei allerdings vorausgesetzt werden muß, daß der die Spitze der kaustischen Fläche berührende Strahl den Mittelpunkt zwischen den beiden Löchern träfe. Da nun diese Bedingungen nicht erfüllt werden können, so hat man stets mit Fehlerquellen zu rechnen, welche die Anwendbarkeit der Methode beeinträchtigen. Es mag wohl bei sehr engen Öffnungen, wobei Spalte den Löchern vorzuziehen sind, gestattet sein, den mit der Methode ermittelten Schnittpunkt als den Schnittpunkt zweier Strahlen anzusehen, aber da man nicht weiß, um welche Strahlen es sich handelt, so kann man, wenn die Strahlen sich auf der Netzhaut schneiden, keinen anderen sicheren Schluß daraus ziehen, als daß die kaustische Fläche des Strahlenbündels von der Netzhaut geschnitten wird. Da auf der anderen Seite der gegenseitige Abstand zweier Löcher oder Spalte nie hinreichend klein gemacht werden kann, um praktisch als unendlich klein behandelt werden zu können, so ist die Methode in keiner Variante zur Untersuchung der Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels geeignet. Wird in derselben ein Loch bzw. Spalt vor dem Auge bewegt — der Versuch von Mile —, wobei eine gleichsinnige bzw. gegensinnige Scheinbewegung des Objektes der homonymen bzw. heteronymen Diplopie im Scheinerschen Versuche entspricht, so kann zwar die Exkursion beliebig klein gemacht werden, die Beobachtung wird aber um so unsicherer, da kein feststehender Punkt vorhanden ist, und da ganz unabhängig von der optischen Einstellung des Auges näher gelegene Objekte eine im Verhältnis zu ferner gelegenen

gegensinnige parallaktische Scheinbewegung ausführen müssen. Wenn aber dafür gesorgt wird, daß sämtliche sichtbare Objekte in einer die Visierlinie senkrecht schneidenden Ebene gelegen sind und anstatt des Loches ein Spalt in der zur Längenausdehnung desselben senkrechten Richtung vor dem Auge bewegt wird, so stellt jedenfalls der Versuch von Mile einen recht anwendbaren Indikator für die Einstellung des Auges dar. Eine verwandte Methode ist von Holth[1]) unter dem Namen Kineskopie zur Bestimmung der Refraktion empfohlen worden.

Die durch obenstehende Formel bestimmte Abhängigkeit des Projektionskoeffizienten C_0 von der Lage der Blende kann ohne Schwierigkeit demonstriert werden. Damit derselbe bei einer kleinen Verschiebung der Blende die größte mögliche Änderung erfahre, soll bei reeller Blende entweder A oder R einen hohen negativen Wert haben, während die andere dieser Größen einen möglichst abweichenden Wert hat. Wenn man sich durch Vorsetzen eines Konkavglases von 20 dptr eine hochgradige artefizielle Hypermetropie verschafft und durch ein feines Loch einen im Abstande von einigen Zentimetern gehaltenen Gegenstand beobachtet, so sieht man das verschwommene Bild sich bedeutend vergrößern, wenn das Loch vom Auge entfernt wird. Hierbei nimmt nämlich A schnell numerisch zu, während R numerisch abnimmt. Wenn das Auge emmetropisch ist und der Versuch ohne Glas wiederholt wird, so kann man fortwährend die Zunahme der Vergrößerung beim Vergrößern des Abstandes des Loches vom Auge, obwohl nicht in demselben Grade, doch mit auffallender Deutlichkeit konstatieren. Bei dieser Versuchsanordnung bleibt der Wert von R durch die Bewegung des Loches unbeeinflußt. Macht man sich wieder durch Vorsetzen eines Konvexglases von 20 dptr hochgradig myop, so sieht man bei der Beobachtung ferner Gegenstände mit dem Loche die Vergrößerung beim Entfernen desselben vom Auge abnehmen, indem hierbei R einen numerisch größeren Wert erhält, während A unbeeinflußt bleibt. Man kann diesen Effekt verstärken, wenn man an Stelle des fernen Gegenstandes ein virtuelles, hinter dem Auge gelegenes Bild anwendet, wobei A durch Vergrößern des Abstandes des Loches vom Auge numerisch vermindert wird.

Einen sehr guten Indikator für die optische Einstellung des Auges erhält man durch die Chromasie desselben. Da im optischen System nur sammelnde Flächen vorhanden sind, so erfolgt jede Brechung des Lichtes in der Richtung nach der Achse zu, wozu noch kommt, daß in der Linse die Trajektorien eine nach der Achse zu gebogene Form haben. Die chromatischen Differenzen müssen sich deshalb auf dem ganzen Wege des Lichtes durch das optische System des Auges summieren. In Übereinstimmung damit ergibt sich auch ein beachtenswerter Unterschied bei der Bestimmung der Refraktion des Auges unter Anwendung möglichst monochromatischen Lichtes je nach der Wellenlänge desselben. Als einfachstes Mittel zur Verwertung der Chromasie bietet sich ein Kobaltglas dar, wenn man artefizielle Lichtquellen anwendet. In dem von diesen ausgesandten Lichte ist nämlich das Verhältnis der Intensität der kurzwelligeren zu der der langwelligeren

1) S. Holth. Nouveau procédé pour déterminer la réfraction oculaire. Ann. d'oculistique. CXXXI. 1904. S. 1.

Strahlen ein solches, daß das durch ein Kobaltglas von gesättigter Farbe gehende Licht sich praktisch wie nur aus zwei Farben, rot und blau, in passender Proportion zusammengesetzt, verhält, während im Tageslicht der größere Reichtum an kurzwelligen Strahlen die erwünschte Proportion verrückt. Bringt man in einem Ausschnitt vor einer Lichtflamme oder vor dem Nernstlampenspalte ein solches Glas an, so sieht man die so erhaltene Lichtquelle einfarbig purpurn, wenn das Auge scharf eingestellt ist. Stellt man aber dasselbe durch Anstrengung bzw. Entspannung der Akkommodation oder durch Vorsetzen von entsprechenden Gläsern auf einen näheren bzw. ferneren Punkt ein, so sieht man die Lichtquelle von einem blauen bzw. roten Saum umgeben. Der Durchmesser der Zerstreuungskreise ist allgemein gleich dem Produkte des Durchmessers der Eintrittspupille mit dem oben angewendeten Projektionskoeffizienten C_p. Im reduzierten Auge, welches für diese Berechnung hinreichend genau ist, hat $\frac{K}{R}$ unabhängig von der Wellenlänge des Lichtes den Wert der reduzierten Achsenlänge. Da nun R für rotes Licht einen algebraisch größeren Wert hat als für blaues, so hat immer C_p einen algebraisch größeren Wert für rotes Licht als für blaues, woraus folgt, daß die roten bzw. blauen Zerstreuungskreise die größeren sind, je nachdem C_p positiv oder negativ ist. Der überschüssige Teil der größeren Zerstreuungskreise wird als ein um die Lichtquelle sichtbarer Saum in der betreffenden Farbe gesehen. Da aber das blaue Licht dieser Lichtquelle von einem bedeutend ausgedehnteren Spektralbezirk als das rote stammt, so ist der blaue Saum im allgemeinen bei gleichem numerischem Werte von $R - A$ breiter als der rote und bei höherem Werte dieser Differenz wegen der mit zunehmender Zerstreuung abnehmenden Helligkeit weniger leicht zu sehen. Wie aus dem verschiedenen Werte von C_p für die beiden Farben hervorgeht, macht beim Mileschen Versuche stets das rote Licht eine ausgiebigere, gegensinnige, das blaue eine ausgiebigere gleichsinnige Scheinbewegung, und wenn bei scharfer Einstellung des Auges die Lichtquelle einfarbig purpurn gesehen wird, so gehen die Farben bei diesem Versuche auseinander, indem die blaue die Bewegung des Loches mitmacht, die rote in entgegengesetzter Richtung wandert. Für ersteres Licht hat dabei C_p einen negativen, für letzteres einen positiven Wert, und die Netzhaut liegt zwischen den durch die beiden Lichtarten erzeugten Bildpunkten in solchem Abstande von demselben, daß die Zerstreuungskreise beider Farben annähernd gleiche Größen haben. Bei ausgedehnteren Lichtquellen zeigt sich das Auseinandergehen der Farben im Auftreten eines blauen Saumes auf der einen, eines roten Saumes auf der anderen Seite der Lichtquelle, wenn aber der Nernstlampenspalt angewendet wird und die Verschiebung des Loches in der auf dem Spalte senkrechten Richtung stattfindet, so sieht man eine blaue und eine rote Lichtlinie nebeneinander. Ähnlich wie der Versuch von Mile wirkt die partielle Zudeckung der Pupille durch Vorschieben eines dünnen Kartonblattes von einer Seite her: ist ein roter bzw. blauer Saum vorhanden, so verschwindet derselbe von der entgegengesetzten bzw. von derselben Seite her, und bei maximalem Vorschieben des Blattes sieht man immer im letzten Augenblicke — normales Auge vorausgesetzt — an ausgedehnteren Lichtquellen auf der einen Seite

einen roten, auf der anderen einen blauen Saum, am Nerstlampenspalte aber die beiden farbigen Linien nebeneinander.

Obwohl zur Erklärung der soeben erörterten Erscheinungen nur die Gesetze erster Ordnung zur Anwendung gekommen sind, ist dieselbe dennoch hinreichend genau und hätte mit Rücksicht auf die Aberration eigentlich nur darin modifiziert zu werden, daß die Ursache der größeren Breite des blauen Saumes nicht nur die oben angegebene, sondern zum Teil auch darin zu suehen ist, daß die Aberration innerhalb der optischen Zone einen positiven Wert hat, wodurch die Zerstreuung des Lichtes hinter dem zum Sehen angewendeten Teile der kaustischen Fläche größer wird als vor demselben; sowie darin, daß an Stelle der Zerstreuungskreise tatsächlich die Querschnitte der kaustischen Fläche treten. Dadurch, daß es sich nur um die am äußeren Umfange dieser Querschnitte auftretenden Erscheinungen handelt, wobei die Größe derselben ohne Belang ist, wird es bedingt, daß die Gesetze erster Ordnung zuverlässige Resultate ergeben, und daß die Methode der Chromasie die sicherste Methode zur Beurteilung der scharfen Einstellung des Auges darstellt.

Der geringfügige physiologische Astigmatismus des Auges läßt sich auch unter Anwendung einer runden Lichtquelle mit dieser Methode demonstrieren, indem gewöhnlich bei der schärfsten Einstellung in zwei einander entgegenstehenden Richtungen rote Säume oder in den senkrecht auf diesen Richtungen stehenden blaue Säume oder beide Arten auf einmal gesehen werden, wobei die durch die blauen Säume bestimmte Richtung mit dem am stärksten brechenden Hauptschnitte des optischen Systems zusammenfällt.

Oben wurde bei der Erörterung der Methoden zur Untersuchung weit geöffneter Strahlenbündel (S. 31 ff.) dargelegt, wie durch die Untersuchung der Querschnitte der kaustischen Fläche auf einer Schirmebene die Konstitution des Strahlenbündels auch bei kompliziertem Baue desselben ermittelt werden kann, während sich die anderen Methoden nur für einfachere Fälle eignen. In der Netzhaut besitzt das Auge eine Schirmfläche, von welcher die Form der Querschnitte der Strahlenbündel direkt als Gesichtswahrnehmungen zum Bewußtsein kommt. Wenn nun auch diese Schirmebene nicht auf angegebene Weise verschoben werden kann, so ist es doch eine leichte Sache, das Strahlenbündel sozusagen zu verschieben, indem dasselbe durch Vorsetzen von Gläsern mehr oder weniger konvergent gemacht wird. Da es sich hierbei nur um relativ schwache Gläser handelt, so ist die in denselben entstehende Aberration wegen der geringen Größe der Pupille — auch bei maximaler Erweiterung derselben — ohne merkbaren Einfluß auf die beobachteten Erscheinungen. Die durch einen leuchtenden Punkt erhaltenen Bilder sind zwar mehrfach Gegenstand der Untersuchung gewesen, aber solange die betreffenden mathematischen Gesetze unbekannt blieben, konnte das Wesentliche nicht vom Zufälligen geschieden werden, weshalb auch die Konstitution des im Auge gebrochenen Strahlenbündels unbekannt blieb. Die Ermittelung dieser Konstitution durch methodische Untersuchung der Strahlenbündeldurchschnitte habe ich die **subjektive Stigmatoskopie** ge-

nannt. Bei derselben verschafft man sich das zu untersuchende Strahlenbündel durch Beobachtung eines leuchtenden Punktes bei verschiedener optischer Einstellung des Auges. Da es aber zur Vermeidung von Fehlerquellen wünschenswert ist, daß die Winkelgröße des leuchtenden Punktes bei der Änderung der optischen Einstellung unverändert bleibt, so darf man diese nicht durch Änderung des Abstandes desselben, sondern nur durch die Akkommodation oder durch Vorsetzen von Gläsern bewerkstelligen. Um das im Auge entstehende falsche Licht, besonders den Haarstrahlenkranz, unter der Empfindungsschwelle zu halten, ist es vorzuziehen, keine Lichtquelle mit zu starker spezifischer Intensität zu wählen. Endlich tut man gut, im verdunkelten Zimmer und unter Verdeckung des anderen Auges zu beobachten, damit die Pupille ohne künstliche Erweiterung möglichst groß sei. Mit den gewöhnlichen künstlichen Lichtquellen, Gas- oder Petroleumlicht, elektrischem Glühlicht mit mattierter Birne usw., erhält man einen passenden leuchtenden Punkt unter Anwendung eines Loches von 2 mm Durchmesser in einem vor der Lampe aufgestellten Schirme, wobei die Beobachtung am besten in einem Abstande von 4 m vorgenommen wird, und das neben dem Schirme ausstrahlende Licht möglichst vom Zimmer ferngehalten werden soll. Bei der Anwendung des Nernstlampenspaltes befestigt man am besten unmittelbar vor demselben eine Platte mit einem Loche von $^1/_2$ mm Durchmesser und schwächt man außerdem das Licht mit einem Rauchglase von hinreichend gesättigter Farbe ab, bis der Haarstrahlenkranz nicht mehr gesehen wird. Zu den Beobachtungen mit einem Kobaltglas ist diese Lichtquelle ohne Rauchglas die beste.

Stellt man sein Auge unter Anwendung der Akkomodation oder durch Vorsetzen eines passenden Glases möglichst scharf für den leuchtenden Punkt ein, so sieht man dennoch bei nicht zu kleiner Pupille strahlenähnliche Gebilde von demselben ausgehen. Ist das Auge frei von abnormer Asymmetrie und ein etwa vorhandener Astigmatismus korrigiert, so scheinen dieselben nach allen Richtungen auszustrahlen. Durch partielle Zudeckung der Pupille mit einem vorgeschobenen Kartonblatte und durch Beobachtung mit dem Kobaltglas überzeugt man sich, daß die Strahlengebilde durch Lichtstrahlen entstehen, welche den zentralen Strahl geschnitten haben, bevor das Licht die Netzhaut erreicht, indem dieselben dabei von derselben Seite her verschwinden bzw. eine blaue Farbe zeigen. In den bestgebauten Augen ist die Figur achtstrahlig und hat die Grundform eines vertikal gestellten Kreuzes mit diagonalen Strahlen, von welchen jedoch der eine oder andere gespalten sein kann. Verschafft man sich aber unter Entspannung der Akkommodation durch ein passendes Glas eine Hypermetropie von $1^1/_2$ bis 2 dptr, so sieht man ein dunkleres Zentrum, das von einer helleren zackigen Linie umgeben ist. Die Zacken dieser Linie, welche bei größerer Pupille in Strahlenform verlängert erscheinen, verschwinden auf der entgegengesetzten Seite, wenn die Pupille von einer Seite her zugedeckt wird, und zeigen mit dem Kobaltglas eine rote Farbe, werden also von Lichtstrahlen erzeugt, die den zentralen Strahl nicht vor Erreichung der Netzhaut geschnitten haben. Diese Strahlengebilde sind zahlreicher als die in der gewöhnlichen Sternfigur sichtbaren, und die Orientierung derselben stimmt nicht mit der der letzteren überein, sondern man kann im Gegenteil mit Sicherheit konstatieren, daß in den-

jenigen Richtungen, in welchen deutliche Strahlen der gewöhnlichen Strahlenfigur wahrgenommen werden, keine Strahlen bei dieser optischen Einstellung gesehen werden. Bei künstlich erweiterter Pupille kann man auch eine Einstellung finden, bei welcher beide Arten von Strahlengebilden gleichzeitig gesehen werden und das Alternieren derselben konstatiert werden kann. Durch diese Untersuchung wird es bewiesen, daß das im Auge gebrochene Strahlenbündel von demselben Typus ist wie das diagonalastigmatische, obwohl mit einer größeren Anzahl von Maximis und Minimis der Aberration in den den zentralen Strahl enthaltenden Normalschnitten der Wellenfläche. Dieselbe hat auch schon durch das Vorhandensein des dunkleren Zentrums in dem bei hypermetropischer Einstellung gesehenen Bilde das Resultat erbracht, daß die Aberration längs dem zentralen Strahle positiv ist.

Zur näheren Untersuchung der Aberration geht man am besten von einer Einstellung aus, bei welcher das bewaffnete Auge eine Myopie von 4 dptr hat, indem die Refraktion durch Wechseln der Gläser von halber zu halber Dioptrie bei entspannter Akkommodation immer mehr erhöht wird. Man sieht dann zunächst einen hellen Zerstreuungskreis, welcher zwar von helleren Punkten gestichelt erscheinen kann, aber keine deutlich helleren Teile von dunkleren abgrenzen läßt. Die beim Hinausrücken des Fernpunktes eintretende Veränderung zeigt sich dann zunächst darin, daß in der Mitte ein mehr oder weniger regelmäßiger heller Punkt auftritt, um welchen dann die Strahlengebilde sichtbar werden, um schließlich der oben beschriebenen zackigen Linie Platz zu machen. Jener Punkt ist die Spitze, die zackige Linie ein Querschnitt der kaustischen Fläche. In Strahlenbündeln, in welchen die Aberration, wie im Auge, in verschiedenen, den zentralen Strahl enthaltenden Normalschnitten der Wellenfläche verschiedene Werte hat, kann sich ein Querschnitt der kaustischen Fläche nie als regelmäßiger Kreis zeigen, sondern muß entweder eine zackige Form haben oder in mehrere Teile zerklüftet sein. Macht man die Untersuchung bei künstlich erweiterter Pupille, so sieht man bei der Zunahme der Hypermetropie des bewaffneten Auges den Querschnitt der kaustischen Fläche verschwinden ohne die Grenzlinie des Strahlenbündelquerschnittes erreicht zu haben. Es ist hierdurch bewiesen, daß ein Normalschnitt der kaustischen Fläche die in der Fig. 5 S. 29 dargestellte Form hat und daß eine Linie $R = 0$ in der Pupille vorhanden ist. In Übereinstimmung hiermit findet man auch bei künstlich erweiterter Pupille den Strahlenbündelquerschnitt, an welchem die Spitze der kaustischen Fläche gesehen wird, durch eine helle zackige Linie begrenzt, die Schnittlinie des umgebogenen Teiles der kaustischen Fläche.

Den Durchmesser der Linie $R = 0$ in der Pupille, welche die optische Zone derselben umschließt, erhält man bei derjenigen Einstellung, bei welcher mit zunehmender Hypermetropie des bewaffneten Auges die Schnittlinie der kaustischen Fläche zum letztenmal gesehen wird, wenn man das kleinste vor das Auge gehaltene Diaphragma bestimmt, mit welchem noch die Schnittlinie gesehen werden kann. Mit diesem Durchmesser und dem Refraktionsunterschiede dieser Einstellung und derjenigen, bei welcher die Spitze der kaustischen Fläche gesehen wird, kann die Aberration innerhalb der optischen Zone berechnet werden. Der Refraktionsunterschied ergibt nämlich den Abstand $s - s_0$ der Kante der kaustischen Fläche von der

Spitze derselben und der Neigungswinkel w ist gleich dem durch die hintere Brennweite des Auges dividierten Krümmungshalbmesser der optischen Zone, wenn man die Abstände des Diaphragmas und der Pupille vom ersten Hauptpunkt des Auges vernachlässigt. Auf diese Weise ergibt sich die Formel

$$A = \frac{8\,f^4\,D}{1000\,n\,d^2}$$

in welcher f die hintere Brennweite des Auges, n den Brechungsindex des Glaskörpers, d den Durchmesser der optischen Zone und D den in Dioptrien gemessenen Refraktionsunterschied darstellt, während sonst der Millimeter die Längeneinheit ist. Bei der Anwendung dieses Wertes ist es aber zu beachten, daß derselbe durch eine Serienentwicklung erhalten ist, bei welcher nur das erste Glied mitgenommen wird, und daß das Vorhandensein einer Kante auf der kaustischen Fläche beweist, daß Glieder höherer Ordnung mit negativem Werte in der vollständigen Serie enthalten sind, woraus wiederum folgt, daß die obenstehende Formel einen zu niedrigen Wert ergibt.

Wird bei der subjektiven Stigmatoskopie der Refraktionsunterschied gemessen zwischen der Einstellung, bei welcher die Spitze der kaustischen Fläche gesehen wird, und derjenigen, bei welcher das Auge seine maximale Sehschärfe erhält, so ergibt sich durch denselben die Hypermetropie, welche längs dem zentralen Strahle in einem für unendliche Ferne eingestellten Auge vorhanden ist. Daß diese bei erweiterter Pupille einen größeren Wert hat als bei Mittelgröße derselben, ersieht man schon daraus, daß bei möglichst scharfer Einstellung bei künstlich erweiterter Pupille die um den leuchtenden Punkt sichtbaren Strahlengebilde durch Lichtstrahlen entstehen, welche den zentralen Strahl vor Erreichung der Netzhaut nicht geschnitten haben, sondern bei partieller Zudeckung der Pupille von der entgegengesetzten Seite her verschwinden und mit dem Kobaltglase rot leuchten. Hieraus geht nämlich hervor, daß bei erweiterter Pupille ein mehr nach vorn liegender Querschnitt der kaustischen Fläche bei der besten Einstellung des Auges auf die Netzhaut fällt.

Auf der anderen Seite kann man sich durch einen einfachen Versuch überzeugen, daß auch während der kräftigsten Akkommodation die Aberration innerhalb der optischen Zone positiv bleibt. Wenn man nämlich durch Vorsetzen von Gläsern den Nahepunkt des Auges in den Abstand des leuchtenden Punktes verlegt, so daß man gerade mit der kräftigsten Anstrengung der Akkommodation denselben scharf sehen kann, so findet man, daß bei der Akkommodation immer zunächst die Schnittlinie der kaustischen Fläche gesehen wird, woraus folgt, daß dieselbe stets vor dem zum deutlichen Sehen angewendeten Querschnitt des Strahlenbündels liegt.

Voraussetzung der oben beschriebenen Methode zur Messung der Aberration ist, daß der Untersuchende es versteht, seine Akkommodation bei den verschiedenen Einstellungen gehörig zu entspannen. Wenn dies nicht der Fall ist, so kann dennoch die Aberration unter Anwendung des künstlichen Astigmatismus mit der subjektiven Stigmatoskopie gemessen werden. Setzt man seinem Auge ein starkes Zylinderglas, 5 dptr oder mehr, vor, so sieht man, während die Einstellung unter Anwendung von sphärischen Gläsern

oder durch die Akkommodation sukzessive geändert wird, die Schnittlinien beider Schalen der kaustischen Fläche in zwei aufeinanderfolgenden Serien. Wenn man aber dann die Stärke des Zylinderglases von halber zu halber Dioptrie vermindert und jedesmal die ganze Schnittserie der kaustischen Fläche untersucht, so kommt man bald zu einem Werte des Zylinderglases, gewöhnlich 4 dptr, bei welchem die Serie der einen Schale auf demselben Querschnitt anfängt, wo die der anderen aufhört. Dieser Wert ist dann der gesuchte, in die obenstehende Formel einzuführende Refraktionsunterschied. Wird wiederum ein um die Hälfte kleinerer Wert des Zylinderglases angewendet, so findet man die Schnittserie der Fig. 8 S. 35 wieder, obwohl die Erscheinungen wegen der multiplen Kantenbildungen an der kaustischen Fläche und dem daraus resultierenden zerklüfteten Aussehen der Querschnitte derselben weniger leicht zu beobachten sind. Das dort erwähnte pfeilspitzenähnliche Aussehen an zwei einander gegenüberliegenden Punkten ist aber ohne Schwierigkeit zu konstatieren.

Die subjektive Stigmatoskopie erlaubt auch die Messung der normalen Asymmetrie. Es empfiehlt sich, in der Nomenklatur vom zentralen Strahl auszugehen, also, wenn derselbe nicht durch das anatomische Zentrum der Pupille geht, von einer Dezentration der letzteren zu sprechen. Zunächst kann man an dem die Spitze der kaustischen Fläche enthaltenden Querschnitt konstatieren, ob — nach sorgfältiger Korrektion eines etwa vorhandenen Astigmatismus — der der Spitze entsprechende helle Fleck im Zentrum der Strahlenfigur gesehen wird oder nicht, und ob sich dieses Verhalten bei der Änderung der Pupillengröße unverändert hält oder nicht. Durch Schätzen der Asymmetrie erhält man einen Wert, aus welchem die Dezentration des anatomischen Zentrums der Pupille in bezug auf das optische Zentrum derselben, den Schnittpunkt mit dem zentralen Strahle, berechnet werden kann. Ebenso läßt sich eine Dezentration der optischen Zone aus dem verschiedenen Verhalten der kaustischen Fläche in verschiedenen Richtungen berechnen. Für die Details dieser Methoden ebenso wie für die Untersuchung höherer Grade von Asymmetrie oder Dezentration verweise ich auf meine bezüglichen Arbeiten[1]).

Bei den beschriebenen Versuchen macht man bald die Erfahrung, daß unter Anwendung kräftigeren Lichtes die verschiedenen Teile der kaustischen Fläche mehr ineinander fließen, bei sehr kleinem leuchtenden Punkte und schwächerem Lichte aber manchmal gewisse Teile unsichtbar werden. So kann besonders die zackige helle Linie, welche den Durchschnitt der kaustischen Fläche darstellt, unter der letzterwähnten Versuchsbedingung in verschiedene getrennte helle Punkte zerfallen, was übrigens auch mit dem bei größerer Pupille an demselben optischen Querschnitte wie die Spitze der kaustischen Fläche gesehenen umgebogenen Teile derselben der Fall sein kann. Die auf diese Weise entstehende mehrfache Abbildung kann am einfachsten durch die Beobachtung des an einem Stecknadelkopfe entstehenden Lichtreflexes konstatiert werden, wenn die Nadel dem beobachtenden Auge hinreichend genähert bzw. bei der Beobachtung die Akkommodation passend entspannt wird. Auf dieselbe Weise gelingt es den meisten Augen, eine feine schwarze Linie auf weißem Papier in passendem Abstande deutlich verdoppelt zu sehen.

1) a. a. O. Allgemeine Theorie usw. S. 189 ff. — Die Konstitution usw. S. 230 ff.

Wie schon erläutert worden ist, läßt sich in einfacheren Fällen das Vorzeichen der Aberration durch die optische Projektion im Strahlenbündel bestimmen, wobei aber die Objektlinien und die Schirmebene auf einer und derselben Seite des brechenden Apparates gelegen sein müssen. Ohne dies zu beachten, hat Tscherning die Aberration mit einem Aberroskop[1]) beobachten wollen, welches aus einem quadratischen, auf der ebenen Fläche einer plankonvexen Linse eingeritzten, möglichst undurchsichtigen Linien-netze besteht und in einem Abstande von 10 bis 20 cm vor dem Auge in der Richtung nach einem leuchtenden Punkte gehalten wird. In dem durch die artefizielle Myopie bedingten Zerstreuungskreis des leuchtenden Punktes sieht man die Schatten der undurchsichtigen Linien. Nach der Meinung von Tscherning sollte eine nach dem Zentrum zu konvexe bzw. konkave Krümmung eine positive bzw. negative Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels beweisen. Das Projektionsphänomen beruht aber, wie ich bewiesen habe, nur zum Teil auf der Aberration, zum Teil aber auf einer anderen Größe, welche im lebenden Auge nicht berechnet werden kann, und die Aberration, auf welcher die Krümmung der sichtbaren Linien beruht, ist nicht diejenige, welche das zum Sehen angewendete Strahlenbündel charakterisiert, sondern die, mit welcher das beim Versuche in das Auge fallende Strahlenbündel nach der Brechung behaftet ist, was von um so größerer Bedeutung ist, als die Aberration allgemein mit der Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels wechselt.

Auf folgende Weise habe ich es allgemein verständlich gemacht, daß die Ansicht Tschernings über die Bedeutung der mit dem Aberroskop beobachteten Erscheinungen mathematisch unmöglich ist. Wenn man sich an das reduzierte Auge hält und das durch die Linse des Aberroskopes gebrochene Strahlenbündel als aberrationsfrei ansieht, so bilden die Schatten auf der brechenden Fläche einfach gekrümmte Linien, welche in Ebenen liegen, die sich in dem durch die Konvexlinse entworfenen Bilde des leuchtenden Punktes schneiden. Damit aber die Schattenlinien auf der Netzhaut gerade wären, müßten sich diese Ebenen, sobald keine Aberration vorliegt, in dem im Auge entworfenen Bilde des leuchtenden Punktes schneiden, was unmöglich ist, wenn nicht der Bildpunkt nach der Brechung in der Aberroskoplinse mit dem Krümmungsmittelpunkte der brechenden Fläche des reduzierten Auges zusammenfällt.

Von den zwei Gliedern, welche zusammen den Distorsionswert geben, dessen Vorzeichen durch die aberroskopische Untersuchung erhalten wird, wechselt das von der Aberration abhängige sein Vorzeichen, wenn das Bild des leuchtenden Punktes hinter die Netzhaut verlegt wird, das andere aber nicht, weshalb das Vorzeichen der Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels durch die Untersuchung mit dem Aberroskop gefunden werden kann, sobald die Krümmung der Schattenlinien das Vorzeichen wechselt, je nachdem das Bild des leuchtenden Punktes vor oder hinter die Netzhaut fällt. Dies ist nun in der Tat in normalen Augen die Regel, so daß man auf diese, nicht aber auf die von Tscherning angegebene Weise die normale positive Aberration des Auges konstatieren kann. Dagegen ist

1) Optique physiologique. Paris 1898, und an anderen Stellen.

das Aberroskop in keiner Weise hinreichend empfindlich, um die tatsächliche komplizierte Form der kaustischen Fläche hervortreten zu lassen, indem überhaupt kein Schluß aus der Krümmung der in den peripheren Teilen des Zerstreuungskreises sichtbaren Schattenlinien gezogen werden kann. Zur Diagnose der abnormen Asymmetrie dürfte es überhaupt geeignet sein, da es das Vorzeichen der transversalen Asymmetrie angibt, sobald das Vorzeichen der Krümmung der zentralen Schattenlinie unverändert dasselbe bleibt, wenn das Bild des leuchtenden Punktes vor oder hinter die Netzhaut fällt.

Die von Tscherning behauptete Änderung des Vorzeichens der Aberration während der Akkommodation ist durch Untersuchungen mit dem Aberroskope bisher nicht bewiesen worden. Zwar kann man, wie ich selbst konstatiert habe, beobachten, daß die Krümmung der Schattenlinien während der Akkommodation abnimmt. Eine solche Veränderung muß aber teils durch die Verschiebung des vor der Netzhaut liegenden Bildes des leuchtenden Punktes eintreten, und kann teils auch durch die Veränderung der nicht vom Aberrationswerte abhängigen Komponente des Distorsionswertes zustande kommen. Dazu, daß eine Veränderung der Aberration während der Akkommodation konstatiert werde, ist es unumgänglich nötig, daß man zuerst bei emmetropischer Refraktion, die nötigenfalls durch Vorsetzen des passenden Glases zu erzielen ist, auf oben angegebene Weise die positive Aberration konstatiere, dann bei Vorsetzen von immer stärkeren Konkavgläsern bzw. bei entsprechender Änderung der früheren Korrektion akkommodieren lasse, wobei das Aberroskop unmittelbar vor das Korrektionsglas gehalten werden soll. Erst wenn bei der Akkommodation mit dieser Versuchsanordnung sukzessive zuerst nach dem Zentrum zu konvexe Schattenlinien, dann der Lichtpunkt und schließlich entgegengesetzt gekrümmte Schattenlinien sichtbar würden — alles mit einer und derselben Korrektion und ohne Änderung des Abstandes des Aberroskopes vom Auge — erst dann wäre durch die Untersuchung mit dem Aberroskope bewiesen, daß die normale positive Aberration während der Akkommodation negativ wird.

Bei der optischen Abbildung im Auge spielt die geometrische Strahlenvereinigung wegen der Größe des Öffnungsverhältnisses eine dominierende Rolle im Verhältnis zur Diffraktion am Rande der Pupille. Wenn aber diese unter dem Einflusse einer kräftigen Akkommodationsanstrengung oder durch künstliche Mittel sehr klein wird, läßt sich der Einfluß der Diffraktion ohne Schwierigkeit demonstrieren, indem man bei hochgradiger künstlicher Ametropie den von einem kleinem leuchtenden Punkt herrührenden Zerstreuungskreis beobachtet. Man sieht dann eine Lichtkonzentration am Rande, wodurch der Eindruck eines helleren Ringes entsteht, welcher, wenn die Pupille hinreichend eng ist, nach innen gewöhnlich von einem dunklen Saume begrenzt erscheint. Daß es sich hierbei um eine Diffraktionserscheinung, nicht um die Aberration handelt, geht teils aus der regelmäßigen Ringform hervor, da die kaustische Fläche ein zackiges oder zerklüftetes Aussehen darbieten muß, wird aber teils auch daraus bewiesen, daß die Erscheinung dieselbe ist, ob das bewaffnete Auge eine hochgradige Myopie oder Hypermetropie aufweist. Sehr deutlich tritt das Phänomen zutage, wenn man die kleine Pupille durch ein Loch von höchstens 2, am

besten 1 mm Durchmesser in einer vor das Auge gehaltenen Platte ersetzt. Man sieht dann oft das dunklere Zentrum sich in konzentrische, von dunklen Zwischenräumen getrennte, relativ helle Kreise auflösen.

2. Methoden zur Beobachtung des im Auge entstehenden falschen Lichtes.

Das auf der Netzhaut gelegene optische Bild ist nicht wie auf einen dunklen Schirm entworfen, sondern stets von einem Schleier verhüllt, und oft auch in der Umgebung von anderen Lichterscheinungen begleitet. Von dem auf die eine oder andere Weise einwirkenden falschen Lichte soll hier nur das für die Dioptrik Wichtige berücksichtigt werden. Das übrige falsche Licht dringt teils durch die Sklera ein und entsteht teils durch diffuse Reflexion und Fluoreszenz der inneren Teile des Auges, vornehmlich der Linse und des Augenhintergrundes. Dasselbe ist zwar von hervorragender Bedeutung für die Farbenempfindung, gehört aber nur insofern in das Gebiet der Dioptrik, als es eben durch das Vorhandensein noch einen Beweis dafür erbringt, daß beim Sehen die absoluten Intensitäten am optischen Bilde von untergeordneter, die relativen aber von wesentlicher Bedeutung sind.

In optischen Instrumenten, welche, wie das Auge, zur Abbildung reeller Objekte auf einer Schirmfläche dienen, entsteht bisweilen ein hellerer Fleck im Zentrum des Bildfeldes, der sogenannte Lichtfleck, indem Licht nach einer geraden Anzahl Reflexionen an den brechenden Flächen des optischen Systems den mittleren Teil der Schirmfläche trifft. Auch im Auge ist dies der Fall, wobei sogar ein nach zweimaliger Reflexion, zunächst in der hinteren Linsenfläche und dann in der vorderen Hornhautfläche entstandenes optisches Bild auf die Netzhaut fallen kann. Setzt man in die oben S. 19 angegebenen Formeln die dem exakten schematischen Auge entnommenen Werte ein, so ergibt sich, wenn der Millimeter die Einheit ist:

$$D_{15} = -0{,}09023 \quad H_{15} = -23{,}665 \quad H'_{15} = 25{,}984$$

Der Ort des ersten bzw. zweiten Hauptpunktes ist $H + H_{13} + H_{15}$ bzw. $n' (H' + H'_{15}) + 7{,}2$. Das gesamte katadioptrische System hat somit eine negative Brechkraft von rund 90 dptr, und der erste bzw. zweite Hauptpunkt desselben ist rund 16,8 mm vor der vorderen Hornhautfläche bzw. 36,3 mm hinter derselben gelegen. Der der Netzhaut in diesem System konjugierte Punkt liegt, wie sich aus der Anwendung dieser Daten in der allgemeinen Abbildungsgleichung ergibt, rund 71 mm vor der vorderen Hornhautfläche. Ein hier gelegenes Objekt gibt somit zu einem aufrechten Bilde auf der Netzhaut Anlaß, welches sich, wenn das Objekt bei ruhig gehaltenem Auge seitlich verschoben wird, auf der Netzhaut in derselben Richtung bewegen muß. Vom Auge wird demnach das Bild umgekehrt gesehen, und die scheinbare Verschiebung desselben ist der des Objektes entgegengesetzt. Dieses Bild wurde im lebenden Auge von Becker[1]) gesehen und richtig erklärt, dann wieder vergessen und von Tscherning[2]) ins Leben gerufen,

1) O. Becker, Über Wahrnehmung eines Reflexbildes im eigenen Auge. Wiener Med. Wochenschrift. 1860. S. 670 und 684.

2) a. a. O.

wonach sich unter anderen Gertz[1]) damit eingehend beschäftigt hat. Letzterer hat den Einfluß der dreimal als Blende auftretenden Pupille des Auges in dem katadioptrischen System untersucht. Für einen auf der Netzhaut gelegenen Punkt ist im allgemeinen die Austrittspupille des Auges auch die Austrittspupille des katadioptrischen Systems, woraus folgt, daß die Eintrittspupillen nicht identisch sind. Diejenige des katadioptrischen Systems liegt aber in der Nähe der des Auges (rund $^1/_2$ mm hinter derselben) und hat einen Durchmesser, welcher rund $^3/_4$ des Durchmessers der letzteren beträgt. Es braucht aber nur geringe Asymmetrien der brechenden Flächen oder Dezentrationen, um den Strahlenraum einzuschränken bzw. zu vernichten, indem die Eintrittspupille des katadioptrischen Systems dadurch in der Eintrittspupille des Auges, welche im katadioptrischen System eine Luke darstellt, verschoben wird. Da nun solche Asymmetrien schon im typisch normalen Auge vorhanden sind, so ist es einerseits erklärlich, daß das vom katadioptrischen System erzeugte Bild nicht in allen Augen wahrgenommen werden kann, und folgt daraus anderseits, daß aus der optischen Einstellung des katadioptrischen Systems keine genauen Schlüsse auf die des Auges gezogen werden können oder umgekehrt. Wäre das Auge ein zentriertes Umdrehungssystem, so würde man zwar erwarten können, daß, wenn das exakte schematische Auge richtig ist, in der Mehrzahl emmetropischer akkommodationsloser Augen der oben gefundene Objektabstand von 71 mm der beste zur Beobachtung des Bildes wäre. Da nun aber dies nicht der Fall ist, sondern die schiefe Inzidenz des Lichtes beim dreifachen Durchgange durch das optische System des Auges bedeutende Abweichungen verursachen kann, so darf man nur erwarten, daß bei endlichem Objektabstande das katadioptrische Bild sichtbar gemacht werden kann.

Um dasselbe mit dem einfachsten Mittel beobachten zu können, nähert man im dunklen Zimmer bei ruhiger Stellung des Auges eine Kerzenflamme der Gesichtslinie von der Temporalseite her, wobei es als ein schwacher, sich in entgegengesetzter Richtung bewegender Lichtfleck zeigt. Mir selbst gelang dieser Versuch stets bis vor einigen Jahren. Dann konnte ich bald den Lichtfleck sehen, bald nicht, während es mir jetzt gar nicht gelingt, denselben mit diesem Versuche beobachten zu können. Mit dem Spalte meines elektrischen Handaugenspiegels sehe ich ihn aber wieder, wahrscheinlich wegen der höheren spezifischen Lichtstärke. Tscherning empfiehlt, die Lichtquelle unterhalb der Gesichtslinie vorbeizuführen. In der Versuchsanordnung von Gertz wird das Bild einer Blende in der Eintrittspupille des Auges erzeugt, wodurch diese bis zur Größe der Eintrittspupille des katadioptrischen Systems abgeblendet werden soll. Auf diese Weise wird die Intensität des direkt gesehenen Bildes ohne Schwächung der des katadioptrischen herabgesetzt, was die Beobachtung erleichtern muß.

Im Auge kann unter physiologischen Verhältnissen ein ringförmiges Beugungsspektrum auf zweierlei Weise entstehen, nämlich einesteils durch Diffraktion des Lichtes an multiplen kleinen rundlichen Gebilden, anderenteils an einem strahlenförmigen Gitter. Erstere kommen bei Sekret-

1) H. Gertz, Über das sekundäre katadioptrische Bild des Auges. Skand. Arch. f. Physiol. XXII. 1909. S. 299.

auflagerung auf der Hornhaut und bei unregelmäßiger Eintrocknung der Oberfläche derselben vor, wobei die Epithelzellen die Formelemente darstellen; letzteres ist in dem physiologischen Aufbaue der Linse vorhanden. Die farbigen Ringe erster Art verschwinden, wenn eine Karte von einer Seite her vor die Pupille geschoben wird, allmählich und überall gleichzeitig, indem jedes der verursachenden Gebilde ein ringförmiges Spektrum erzeugt, und die Lichtstärke des durch Superposition der einzelnen Spektren entstehenden farbigen Ringes der Anzahl wirksamer Elemente proportional ist. Viele Menschen sehen habituell, besonders beim Erwachen aus dem Schlafe, einen solchen Ring das um eine helle Lichtquelle sichtbare diffuse Licht nach außen abgrenzen.

Deutlicher sind die Farben in dem in der Linse entstehenden Ringe, welcher auch größer ist. Die meisten Menschen sehen denselben im dunklen Zimmer bei dilatierter Pupille mit einem Winkeldurchmesser von 6 bis 7° kleine helle Lichtquellen gegen dunklen Hintergrund umgeben. Der Ring enthält die Farben des Spektrums, wobei rot nach außen liegt, und der angegebene Durchmesser dem Gelb entspricht. Bei künstlichen Lichtquellen, welche wenig kurzwelliges Licht enthalten, sieht man das Spektrum gewöhnlich nur bis blaugrün recht deutlich. Hält man vor das Auge ein kleines Loch, so verschwindet der Ring vollständig, sobald dieses auf der Pupille zentriert ist. Verschiebt man es aber in radiärer Richtung, so treten in dem Augenblicke, wo es den Rand der erweiterten Pupille erreicht, zwei kleine Spektra auf, deren Verbindungslinie durch die Flamme geht und senkrecht auf der Verschiebungsrichtung steht. Auf diese Weise kann man nach Belieben zwei diametral einander gegenüberliegende Teile des Kreises hervortreten lassen. Hierdurch wird bewiesen, daß es sich um ein radiäres, nur in der Nähe des Pupillenrandes wirkendes Gitter handelt, wie es nur im Linsenkortex vorhanden ist. Dieser Beweis kann auch durch partielle Zudeckung der Pupille mit einer vorgeschobenen Karte oder dergleichen geliefert werden. Wird die Karte von der Temporalseite her mit vertikaler Kante vorgeschoben, bis nur ein kleines Segment der Pupille am nasalen Rande frei bleibt, so sieht man den oberen und unteren Teil des Ringes, während die beiden Seitenteile verschwunden sind. Von dem in der Linse enthaltenen Gitter ist dann nur ein Teil unbedeckt, welcher horizontale Fasern enthält, nebst solchen, deren Verlaufsrichtung wenig von der horizontalen abweicht, weshalb nur diejenigen Teile des Ringes sichtbar sein können, in welchen die Tangente zu der Verlaufsrichtung unbedeckter Fasern parallel ist. Manche Menschen haben bei der Erschlaffung der Akkommodation oder in Aufregungszuständen hinreichend große Pupillen, um den Ring unmittelbar zu sehen. Anderen gelingt nur der Versuch mit dem Loche ohne künstliche Erweiterung der Pupille, wenn das andere Auge zugedeckt ist; bei anderen ist wiederum ohne Mydriaticum überhaupt nichts vom Farbenring zu sehen. Schon von Beer[1]) und Donders[2]) beschrieben, wurde der

1) Beer, Über den Hof um Kerzenflammen. Poggendorffs Ann. Bd. 84. S. 518. 1851; Bd. 88. S. 595. 1853.

2) Nach der Angabe von J. H. A. Haffmans, Beiträge zur Kenntnis des Glaukoms. Arch. f. Ophth. VIII. 2. S. 124. 1862.

Ring dann wieder von Druault[1]) und Salomonsohn[2]) näher untersucht.

Wie das in der Umgebung intensiver Lichtquellen sichtbare Licht wenigstens zum Teil entsteht, ist aus dem Haarstrahlenkranz ersichtlich, welcher um intensive Lichtquellen mit hinreichend kleiner Winkelgröße in einer Winkelausdehnung von mehreren Graden gesehen wird. Wie schon oben angedeutet wurde, ist die spezifische Intensität des Nernstlichtes hinreichend, und man kann in der Tat die Erscheinung auf bequemste Weise unter Anwendung eines unmittelbar vor dem Spalte befestigten Loches von $^1/_2$ mm Durchmesser beobachten. Der Haarstrahlenkranz besteht aus unzähligen, äußerst feinen, manchmal bunt gefärbten Strahlen, in welchen meistens eine lebhafte Bewegung vor sich geht. Hält man vor das Auge ein Loch, dessen Durchmesser kleiner ist als der der Pupille, so sieht man ein ähnliches Phänomen, kann aber bei richtiger Zentrierung des Loches konstatieren, daß die Strahlen nicht dieselben sind. Da die Bewegung auch bei diesem Versuche gesehen wird, so muß dieselbe von der Bewegung der Tränenflüssigkeit auf der Hornhaut oder von der physiologischen Bewegung des Kammerwassers herrühren. Wird das Loch gedreht, so macht der Haarstrahlenkranz die Drehung mit, ein Beweis für die Entstehung desselben an der Lochkante bzw. bei der direkten Beobachtung, am Pupillenrande. Schiebt man anstatt des Loches eine Karte oder irgendeinen dünnen Schirm mit gerader Kante vor die Pupille, so sieht man schmale, scharf gezeichnete lange Strahlen senkrecht zur Kante in beiden Richtungen vom leuchtenden Punkte ausgehen. Diese können nicht auf andere Weise als durch Brechung und Spiegelung an der Kante selbst entstehen, wobei diese auf dieselbe Weise astigmatisch wirken muß, wie wenn man durch ein dünnes Glasstäbchen eine Lichtquelle betrachtet. Auf ähnliche Weise muß der Haarstrahlenkranz an den Unebenheiten des Pupillenrandes entstehen, indem noch dazu der Einfluß einer wirklichen Diffraktion durch die bunte Farbe angedeutet wird. Die meisten Menschen finden im Haarstrahlenkranze gewisse helle Linien oder Büschel, welche stets, wenn die Beobachtung unter gleichen Versuchsbedingungen ausgeführt wird, auf dieselbe Weise gesehen werden, und welche bei Neigung des Kopfes die Bewegung mitmachen. Wird aber die Neigung schnell ausgeführt, so kommt die entsprechende Bewegung des Haarstrahlenkranzes deutlich in weniger schnellem Tempo nach, um nicht selten zunächst etwas zu weit zu gehen und dann in eine rücksinnige Drehung zur habituellen Lage überzugehen. Da die Regenbogenhaut kein straffes Gewebe ist, so ist es von vornherein zu erwarten, daß die bei plötzlicher Neigung des Kopfes mit physikalischer Notwendigkeit entstehende Strömung im Kammerwasser auf die Fältelung des Pupillenrandes einwirken muß. Die entoptische Beobachtung, welche dies bestätigt, bietet gar keine Schwierigkeiten, wie ich mich an verschiedenen Beobachtern überzeugt habe.

Auf dieselbe Weise wie der Haarstrahlenkranz am Pupillenrande entstehen beim Vorschieben eines Augenlides vor die Pupille die bekannten

1) A. Druault, Sur la production des anneaux colorés autour des flammes. Arch. d'ophth. 18. p. 312. 1898.

2) H. Salomonsohn, Über Lichtbeugung an Hornhaut und Linse. Arch. f. Physiol. Jahrg. 1898. S. 187.

langen, von einer hellen Lichtquelle scheinbar ausgehenden Strahlen, indem das Licht in der den im Durchschnitt dreieckigen Raum zwischen Lidsaum und Hornhaut ausfüllenden Flüssigkeitsschicht gebrochen wird. Wegen des im Verhältnis zu dem Brechungsindex fester Körper niedrigen Brechungsindex des Wassers und wegen der Form der Flüssigkeitsschicht kommt keine Reflexion zustande, so daß man nicht wie beim Vorschieben einer Karte Strahlen nach beiden Richtungen ausgehen sieht, sondern beim Vorschieben des unteren Lides nur nach oben und umgekehrt.

3. Methoden zur Beobachtung entoptischer Objekte.

Wenn in den Medien des Auges Körperchen mit abweichendem Brechungsindex eingeschlossen sind, so wirken dieselben durch Brechung des Lichtes unter Umständen wie undurchsichtige schattenwerfende Körper. Diese Wirkung, welche man am einfachsten durch den Schatten eines Glasstabes oder durch die Erscheinung der Luftbläschen in mikroskopischen Präparaten illustrieren kann, muß um so deutlicher hervortreten, je schärfer die Oberflächenkrümmung der Körperchen ist, und je mehr der Brechungsindex derselben von dem des umgebenden Mediums abweicht. Bei vollkommen undurchsichtigen Körperchen müßte man unter Anwendung einer hinreichend kleinen Lichtquelle die Erscheinungen des Schattens auf gewöhnliche Weise beobachten können. Da nun aber solche Körperchen nicht im normalen Auge vorkommen, sondern Licht immer durchgelassen wird, so ist es ersichtlich, daß man im allgemeinen nicht erwarten darf, den Halbschatten sichtbar machen zu können, sondern daß sich die beobachtbaren Erscheinungen wesentlich im Gebiete des Vollschattens zeigen werden. Es würde deshalb hier unnötig weit führen, die Untersuchung auf den Halbschatten auszudehnen, während auf der anderen Seite eine exakte Untersuchung des Vollschattens, den die Körperchen geben würden, wenn dieselben vollständig undurchsichtig wären, die einzige zuverlässige Grundlage darbietet, auf welche weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit für Licht gestützt werden können.

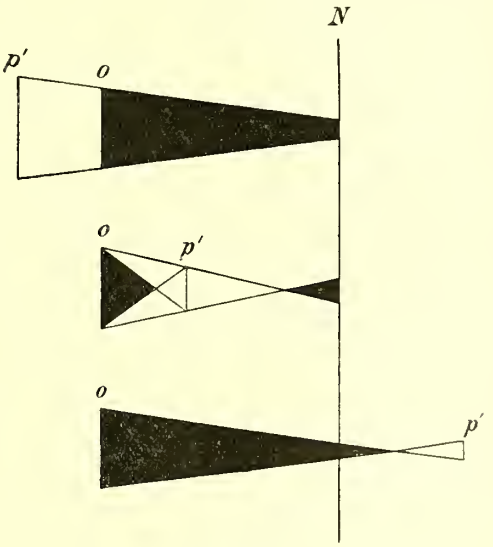


Fig. 14.

Diesen Vollschatten, den ich den fakultativen entoptischen Vollschatten nennen möchte, findet man auf einfache Weise nach schon erörterten Methoden. In der Fig. 14 sind die drei möglichen Fälle eines Vollschattens auf der Netzhaut schematisch dargestellt, indem die Linie N

die Netzhaut, o das im letzten Medium entstehende Bild des schattenwerfenden Körperchens und p′ das dortselbst erzeugte Bild der Lichtquelle andeutet. Werden mit den beiden letzten Zeichen auch die betreffenden Durchmesser angegeben, und stellt δ' bzw. δ_0 den reduzierten Abstand der Netzhaut vom Bilde der Lichtquelle bzw. vom Bilde des schattenwerfenden Körperchens dar, so erhält man aus der obersten Zeichnung mit schon angegebenen Mitteln für den Durchmesser x des Vollschattens auf der Netzhaut die Gleichung

$$\frac{p' - x}{\delta'} = \frac{o - x}{\delta_0}$$

welche sich auch aus der mittleren bzw. unteren Zeichnung ergibt, wenn — x für x bzw. — p′ für p′ gesetzt wird. Da das im letzten Medium entstandene Bild eines in den brechenden Medien des Auges belegenen Punktes stets vor der Netzhaut liegt, so ist immer δ_0 positiv. Der Fall $\delta' = \delta_0$ läßt sich wegen der Unmöglichkeit, das Auge hinreichend ruhig zu halten, praktisch nicht realisieren, und bei $\delta' = 0$ ist überhaupt kein Vollschatten auf der Netzhaut vorhanden. Es folgt hieraus, daß nur die drei in der Fig. 14 schematisch dargestellten Fälle möglich sind, und daß diese sich in der Formel

$$x = \varepsilon \frac{\delta' o - \varepsilon_1 \delta_0 p'}{\delta' - \delta_0}$$

zusammenfassen lassen, in welcher $\varepsilon = \pm 1$ ist, je nachdem $\delta'(\delta' - \delta_0) \gtrless 0$ ist und $\varepsilon_1 = \pm 1$, je nachdem $\delta' \gtrless 0$ ist. Ein negativer Wert von x in dieser Formel gibt an, daß kein Vollschatten auf die Netzhaut fällt. Ist p der Durchmesser der Lichtquelle, so ergibt die allgemeine Gleichung $KL' = -D$ die Beziehung

$$p' = \varepsilon_{11} p D (\delta' - \Delta)$$

wo D die Brechkraft des optischen Systems des Auges, Δ den reduzierten Abstand der Netzhaut vom zweiten Brennpunkte desselben darstellt, und $\varepsilon'' = \pm 1$ ist, je nachdem $\delta' - \Delta \gtrless 0$ ist. Man erhält hierdurch allgemein

$$x = \varepsilon \frac{\delta' o - \varepsilon_0 \delta_0 p D (\delta' - \Delta)}{\delta' - \delta_0}$$

wo $\varepsilon_0 = \pm 1$, je nachdem $\delta'(\delta' - \Delta) \gtrless 0$ ist.

Den Einfluß des Ortes der Lichtquelle auf die Größe des Vollschattens könnte man zwar, obwohl in sehr umständlicher Weise, durch geometrische Figuren illustrieren. Da sich aber derselbe unmittelbar aus einer Differentiation ergibt, mag es wohl gestattet sein, auch hier den letzteren Weg zu befolgen. Man erhält

$$\frac{dx}{d\delta'} = -\frac{\varepsilon \delta_0}{(\delta' - \delta_0)^2} (o - \varepsilon_0 p D (\delta_0 - \Delta))$$

und je nachdem diese Größe einen positiven oder negativen Wert hat, nimmt der Durchmesser des Vollschattens auf der Netzhaut zu oder ab, wenn die Lichtquelle so verschoben wird, daß δ' bei positivem Werte numerisch zunimmt, bei negativem numerisch abnimmt.

Im emmetropischen Auge ist $\Delta = 0$ und folglich auch bei beliebigem Orte der Liehtquelle $\varepsilon_0 = +1$. Da weiter sowohl $\frac{\varepsilon\delta'}{\delta' - \delta_0}$ wie δ_0 stets positive Werte haben, so hat x einen positiven bzw. negativen Wert, und ist ein Vollschatten auf der Netzhaut vorhanden oder nicht, je nachdem $\frac{0}{\delta_0}$ größer oder kleiner als pD ist. Die Bedingung des Vollschattens ist somit, daß die reduzierte Winkelgröße des Bildes des schattenwerfenden Körpers auf der Netzhaut die der Lichtquelle in einem der vorderen Brennweite des Auges gleichen Abstande übertrifft, und deckt sich mit der Bedingung, daß auf der Netzhaut die Winkelgröße des Bildes des schattenwerfenden Körpers diejenige des Lichtquellenbildes übersteigt. Da diese Bedingung von δ' unabhängig ist, so findet sich immer ein Vollschatten bei beliebiger Lage der Lichtquelle vor, sobald dies bei einer Lage der Fall ist, mit der schon erwähnten Ausnahme bei der Abbildung der Lichtquelle auf der Netzhaut Der Wert des Differentialquotienten hat, wenn die Bedingung eines Vollschattens bei hinreichend kleiner Liehtquelle erfüllt ist, das entgegengesetzte Vorzeichen von ε. Es folgt hieraus, daß bei reeller Lichtquelle der Vollschatten mit der Entfernung derselben vom Auge stetig abnimmt, während wenn als Lichtquelle ein virtuelles, in großem Abstande hinter dem Auge gelegenes Bild angewendet wird, wobei $\varepsilon = -1$ ist, der Vollschatten mit zunehmender Konvergenz des einfallenden Lichtes stetig zunimmt, bis diese Lichtquelle den Punkt erreicht hat, welcher im ersten Medium dem Orte des schattenwerfenden Körpers konjugiert ist, wonach bei vermehrter Konvergenz des Lichtquellenstrahlenbündels der Vollschatten wieder abnimmt. Wird die Konvergenz vermehrt, bis die Liehtquelle vor der Hornhaut liegt, so tritt wieder der Fall der reellen Lichtquelle ein. Wird ein konstantes Bild einer Lichtquelle von unendlich großem Abstande hinter dem Auge zu unendlich großem Abstande vor dem Auge stetig geführt, so nimmt also der zunächst unmerkbare Vollschatten stetig zu, bis das Maximum erreicht worden ist, um dann stetig bis zum vollständigen Verschwinden abzunehmen, wobei, wenn mehrere schattenwerfende Körperchen in verschiedener Entfernung von der Netzhaut vorhanden sind, der maximale Vollschatten bei verschiedener Lage der Lichtquelle, aber stets bei konvergentem Lichte erhalten wird.

Bei Ametropie sind die Verhältnisse komplizierter. Zunächst geht aus dem Werte von x hervor, daß bei beliebiger Größe des schattenwerfenden Körpers immer eine endliche Strecke vorhanden ist, wo eine beliebig kleine Lichtquelle keinen entoptischen Vollschatten bewirken kann. Wird der Abstand der Lichtquelle vom Einstellungspunkte des Auges mit a bezeichnet, so gilt, wenn allgemein K den Vergrößerungskoeffizienten bei der Abbildung auf der Netzhaut darstellt,

$$K = -\Delta D \qquad -\frac{K^2}{\delta'} = KD + \frac{1}{a}$$

woraus folgt

$$\frac{\delta' - \Delta}{\delta'} = \frac{1}{a\Delta D^2}$$

so daß dem Ausdrueke für x die Form

$$x = \frac{\varepsilon \delta'}{\delta' - \delta_0}\left(o - \frac{\varepsilon_0 \delta_0 p}{a \Delta D}\right)$$

gegeben werden kann. Indem $x = 0$ gesetzt wird, ergeben sich, den beiden Werten von ε_0 entsprechend, zwei Werte für a, welche mit entgegengesetzten Vorzeichen numerisch gleich sind, und welche mit $\pm a_0$ bezeichnet werden mögen. Da nun die im letzteren Ausdrucke für x außerhalb der Parenthese stehende Größe stets positiv ist, und da dasselbe mit $\frac{\varepsilon_0(\delta' - \Delta)}{\delta'}$ und folglich auch mit dem zweiten innerhalb der Parenthese stehenden Gliede der Fall ist, so folgt hieraus, daß x einen positiven oder negativen Wert hat, und ein Vollschatten demnach vorhanden ist oder nicht, je nachdem a numerisch größer oder kleiner als a_0 ist. Es gibt also immer auf beide Seiten des Punktes, für welchen das Auge eingestellt ist, eine endliche Strecke mit dem numerischen Werte a_0, innerhalb welcher kein Vollschatten entsteht, und deren Ausdehnung sowohl von dem Grade der Ametropie und der Größe der Lichtquelle, wie namentlich von der Größe und Lage des schattenwerfenden Körperchens abhängig ist.

Im Falle $\delta' = \delta_0$ wird die innerhalb der Parenthese im Ausdrucke für x stehende Größe identisch dieselbe wie die innerhalb der Parenthese im Ausdrucke für den Differentialquotienten stehende. Es folgt hieraus, daß wenn in diesem Falle ein Vollschatten vorhanden ist, wobei o numerisch größer als $pD(\delta_0 - \Delta)$ sein muß, das Vorzeichen des Differentialquotienten allgemein von demjenigen von ε_0 unabhängig ist und nur mit dem von ε wechselt, während, wenn das Vorzeichen des Differentialquotienten mit dem von ε_0 wechselt, kein Vollschatten im Falle $\delta' = \delta_0$ vorhanden ist. Wird die Lichtquelle von einem beliebigen Ausgangspunkte zu unendlich großem Abstande vor dem Auge und dann von unendlich großem Abstande hinter dem Auge bis zum Ausgangspunkte geführt, so wechselt ε sein Vorzeichen beim Durchgang durch den Einstellungspunkt des Auges und durch den scheinbaren Ort des schattenwerfenden Körperchens, während dies mit ε_0 im ersteren Punkte und in unendlicher Ferne der Fall ist. Im ersteren Punkte ist x negativ, so daß stets nur je ein Vorzeichenwechsel von ε und ε_0 in dem Gebiete vorkommt, wo ein Vollschatten entsteht. Da nun, wenn ein Vorzeichenweschel von ε_0 das Vorzeichen des Differentialquotienten beeinflußt, der Punkt, wo ε sein Vorzeichen wechselt, wie eben bewiesen wurde, außerhalb dieses Gebietes gelegen ist, so folgt hieraus, daß innerhalb dieses Gebietes nur ein Vorzeichenwechsel des Differentialquotienten stattfindet. Dies ist damit gleichbedeutend, daß der Durchmesser des Vollschattens, wenn man bei der beschriebenen Verschiebung der Lichtquelle vom Einstellungspunkte des Auges ausgeht, von dem Momente ab, wo ein Vollschatten sichtbar ist, stetig zunimmt, ein Maximum erreicht und dann stetig abnimmt, bis der Vollschatten wieder verschwindet, bevor der Einstellungspunkt von der anderen Seite erreicht wird. Da das Maximum dem Orte des Vorzeichenwechsels des Differentialquotienten entspricht, so erhält man dasselbe, wenn die Lichtquelle sich im scheinbaren Orte des schattenwerfenden Körperchens oder in unendlicher Ferne befindet, je nachdem o numerisch größer oder kleiner als $pD(\delta_0 - \Delta)$ ist, d. h. je nachdem die im hinteren Brennpunkte des Auges

gemessene reduzierte Winkelgröße des schattenwerfenden Körperchens größer oder kleiner ist als die Winkelgröße der Lichtquelle in einem der vorderen Brennweite des Auges gleichen Abstande. Die beiden Maxima sind aber nicht gleichwertig. Wären die Gesetze erster Ordnung ohne Einschränkung gültig, so würde bei richtiger Zentrierung der maximale Vollschatten das ganze Feld ausfüllen, wenn das Maximum bei $\delta' = \delta_0$ liegt, während, wenn das Maximum bei unendlicher Entfernung der Lichtquelle erhalten wird, der Wert von x stets endlich ist, sofern nicht der schattenwerfende Körper bei myopischem Refraktionszustande im hinteren Brennpunkte des Auges gelegen ist.

Eine besondere Untersuchung erheischt der singuläre Fall, wo o numerisch gleich $pD(\delta_0 - \Delta)$ ist. Wird in die Vorzeichenbedingung für ε_0 die Bedingung $\delta' = \delta_0$ eingeführt, so ergibt sich, daß, wenn die Lichtquelle im scheinbaren Orte des schattenwerfenden Körpers gelegen ist, ε_0 stets dasselbe Vorzeichen wie $\delta_0 - \Delta$ hat, so daß für diese Lage der Lichtquelle die den singulären Fall charakterisierende Bedingung mit der Bedingung $o = \varepsilon_0 pD(\delta_0 - \Delta)$ identisch ist. Wird dieselbe in den zuerst angegebenen Ausdruck für x eingeführt, so ergibt sich $x = -\varepsilon\varepsilon_0 pD\Delta$, woraus folgt, daß x, wenn die Lichtquelle durch diesen Punkt geführt wird, wobei ε das Vorzeichen wechselt, plötzlich von einem endlichen negativen zu demselben Werte mit positivem Vorzeichen übergeht oder umgekehrt, wobei entweder ein Vollschatten mit endlicher Ausdehnung plötzlich entsteht oder, wenn früher vorhanden, verschwindet. Der Abstand des scheinbaren Ortes des schattenwerfenden Körpers vom Einstellungspunkte des Auges hat dabei den numerischen Wert von a_0, und wenn derselbe mit umgekehrtem Vorzeichen eingesetzt wird, wobei auch ε_0 entgegengesetztes Vorzeichen hat, so resultiert wie im allgemeinen Falle $x = 0$. Es folgt hieraus, daß, wenn die Lichtquelle vom Einstellungspunkte des Auges aus an dem scheinbaren Orte des schattenwerfenden Körpers vorbei bis in unendliche Ferne geführt wird, der an diesem Orte plötzlich entstandene Vollschatten bei der weiteren Veränderung des Ortes der Lichtquelle von konstanter Größe ist. Wird aber dann die Lichtquelle von unendlichem Abstande mit entgegengesetztem Vorzeichen dem Einstellungspunkte des Auges von der anderen Seite her genähert, wobei $\varepsilon_0(\delta_0 - \Delta)$ negativ ist, und der Differentialquotient einen endlichen Wert hat, so nimmt der Durchmesser des Vollschattens stetig ab, um in dem Augenblicke, wo der Abstand der Lichtquelle vom Einstellungspunkte bis zum numerischen Werte von a_0 abgenommen hat, zum Werte Null zu sinken. Das Maximum des Vollschattens findet sich also auf der ganzen diejenigen Punkte verbindenden Strecke vor, in welcher im allgemeinen Falle das Maximum alternativ erhalten werden kann.

Eine Versuchsanordnung gibt es, bei welcher der Durchmesser des Vollschattens von der Refraktion des Auges unabhängig ist, wenn nämlich die Lichtquelle im vorderen Brennpunkte desselben gelegen ist. Da hierbei δ' einen unendlich großen Wert hat, wobei sowohl ε wie ε_0 positiv sind, und x den Wert $o - \delta_0 pD$ annimmt, so wird mit einer und derselben Lichtquelle der Vollschatten nur von der Größe des schattenwerfenden Körperchens und vom Abstande desselben von der Netzhaut bestimmt.

Bei der Verwertung der hier erhaltenen Resultate darf man nicht außer Acht lassen, daß in der Untersuchung nur die Gesetze erster Ordnung zur

Anwendung gekommen sind, und daß die komplizierte Aberration des im Auge gebrochenen Strahlenbündels geeignet ist, einen kleineren Vollschatten unsichtbar zu machen, so daß das Gebiet, wo kein Vollschatten erhalten wird, in der Wirklichkeit größer sein muß, als aus der Rechnung hervorgeht. Was speziell das bei kleineren schattenwerfenden Körperchen und unendlichem Abstande der Lichtquelle vorhandene Maximum des Vollschattens betrifft, so entsteht dasselbe in der Rechnung dadurch, daß das Bild der Lichtquelle laut den Gesetzen erster Ordnung hierbei unendlich klein wird. Da nun aber dies wegen der Aberration nicht der Fall ist, so läßt sich erwarten, daß Körperchen, deren Vollschatten bei unendlichem Abstande der Lichtquelle das Maximum erreicht, nicht immer einen entoptisch wahrnehmbaren Vollschatten haben, ohne daß es sich vorhersagen ließe, daß dies die Regel sei. Auch bedingt die verwickelte Beschaffenheit der kaustischen Fläche, daß, wenn das Lichtquellenbild nicht hinreichend weit von der Netzhaut entfernt ist, ein etwaiger entoptischer Vollschatten kaum von einer durch die Form der kaustischen Fläche bedingten Erscheinung unterschieden werden kann, so daß tatsächlich auch bei Emmetropie ein auf beiden Seiten des Einstellungspunktes des Auges gelegener Bezirk vorhanden ist, wo kein verwertbarer Vollschatten entsteht.

Die entoptische Erscheinung ist, wie schon hervorgehoben wurde, durchaus vom fakultativen Vollschatten zu unterscheiden. Wie sich diese gestalten wird, davon kann man sich durch einfache Versuche mit Linsen ein Urteil verschaffen. Wenn man mit einer möglichst punktförmigen Lichtquelle den Schatten einer Linse bei verschiedener Schirmlage beobachtet, so findet man, daß derselbe, wenn der Abstand sowohl der Lichtquelle wie des Schirmes von der Linse sehr groß ist im Verhältnis zur Brennweite derselben, kaum von dem Schatten eines undurchsichtigen Körpers unterschieden werden kann, indem das durch die Linse gehende Licht im Bildpunkte der Lichtquelle eine im Verhältnis zum Abstande des Schirmes sehr starke Divergenz besitzt, sei es daß die Linse sammelnd oder zerstreuend wirkt. Wird dann die Linse dem Schirme genähert, so wird der Schatten schwächer, und es tritt um denselben ein heller Saum auf. Bei einer Konkavlinse geschieht hierin keine Änderung, sondern die Breite des hellen Saumes nähert sich nur um so mehr dem Werte Null, je näher die Linse dem Schirme kommt, während bei einer Konvexlinse zunächst eine Lage erreicht wird, bei welcher die äußere Grenze des hellen Saumes die des Schattens erreicht hat. Hierbei würde, wenn die Lichtquelle tatsächlich unendlich klein, der Linsenrand vollkommen scharf, die Lichtverteilung im Zerstreuungskreise vollkommen gleichmäßig wäre, und wenn kein Licht durch Reflexion und Absorption verloren ginge, überhaupt nichts auf dem Schirme zu sehen sein. Tatsächlich erreicht aber der Schatten hier nur das Minimum der Sichtbarkeit. Wird die Linse dem Schirme weiter genähert, so sieht man einen ringförmigen Schatten den hellen Zerstreuungskreis umgeben, welcher letztere sich immer mehr verkleinert, dann in das scharfe Bild der Lichtquelle übergeht, um endlich wieder größer zu werden. Auf ähnliche Weise muß es sich im Auge mit den entoptisch sichtbaren Körperchen verhalten, deren Brechungsindex nur wenig von dem des umgebenden Mediums abweicht. Dieselben müssen somit den maximalen Schatten geben, wenn die Licht-

quelle eine solche Lage hat, daß das durchgehende Licht möglichst divergent ist. Da nun die im normalen Auge entoptisch sichtbaren Körperchen in der Regel sammelnd wirken, so folgt hieraus, daß der deutlichste Schatten erhalten werden muß, wenn konvergentes Licht zur Anwendung kommt, und das Bild der Lichtquelle im letzten Medium zwischen der Netzhaut und dem Bilde des schattenwerfenden Körpers, dem letzteren so nahe wie möglich, gelegen ist. Zerstreuend dürften nur gewisse Bildungen in der Linse wirken können, welche aber im typisch normalen Auge wohl kaum vorhanden sind, aber sowohl die Fettkugeln auf der Hornhautoberfläche wie die Fältelungen derselben und die im Glaskörper entoptisch sichtbaren Gebilde wirken sammelnd. Was die letzteren betrifft, so ist es offenbar, daß, je näher dieselben der Netzhaut liegen und je kleiner der Brechungsunterschied ist, um so eher der Fall eintreten muß, daß ein wirklicher dunkler Vollschatten nicht gesehen werden kann, da erstens zum Entstehen eines solchen ein sehr kurzer Abstand des Lichtquellenbildes nötig wäre, wobei die Zentrierung wegen der Beweglichkeit des Glaskörpers die größten Schwierigkeiten darbietet, und zweitens bei zu kurzem Abstande des Lichtquellenbildes von der Netzhaut die Erscheinungen der kaustischen Fläche in den Vordergrund treten. Man sieht deshalb auch den Vollschatten dieser Gebilde nur zufällig bei der Untersuchung der kaustischen Fläche, besonders in der Nähe der Spitze derselben, mit der subjektiven Stigmatoskopie.

Bei der Berechnung der entoptischen Parallaxe hat man die Lichtquelle unter Anwendung des schattenwerfenden Körperchens als Projektionszentrum auf die Netzhaut optisch zu projizieren. In der allgemeinen Gleichung des linearen Projektionskoeffizienten $C = K(1 - \delta' B)$ hat man dazu für K bzw. B die Werte $\frac{p'}{p}$ bzw. $\frac{1}{\delta' - \delta_0}$ einzusetzen, während δ' in dieser Formel dieselbe Bedeutung hat wie oben. Man erhält

$$C = -\delta_0 D \frac{\delta' - \Delta}{\delta' - \delta_0}$$

welche Formel, wie ohne weiteres ersichtlich ist, auch dadurch erhalten werden kann, daß im Ausdrucke für den Durchmesser des Vollschattens C für $\frac{x}{p}$ gesetzt wird, während $o = 0$ und $\varepsilon = \varepsilon_0 = +1$ ist. In dieser Formel stellt C, wenn die Lichtquelle in einer zur Visierlinie senkrechten Richtung verschoben wird, das Verhältnis der vom Schatten auf der Netzhaut durchlaufenen Strecke zu der Verschiebungsstrecke der Lichtquelle dar, wobei positives Vorzeichen eine gleichsinnige, negatives eine ungleichsinnige Bewegung angibt, während die scheinbare entoptische Schattenbewegung durch das entgegengesetzte Vorzeichen charakterisiert wird. Da C bei einer Verschiebung der Lichtquelle in der Richtung der Visierlinie teils bei $\delta' = \delta_0$, teils bei $\delta' = \Delta$ sein Vorzeichen wechselt, so folgt hieraus, daß die ganze Strecke von unendlich großem Abstande hinter dem Auge zu unendlich großem Abstande vor dem Auge durch den scheinbaren Ort des schattenwerfenden Körpers in zwei Teile geteilt ist, in welchen die Schattenbewegung eine konstante Richtung hat, während beim Übergang vom einen Teil zum

anderen, wenn die Lichtquelle durch den scheinbaren Ort des schattenwerfenden Körpers geht, die Richtung der Schattenbewegung wechselt. In dem Augenblicke des Richtungswechsels hat der Projektionskoeffizient einen unendlich großen Wert, so daß bei stetiger Verschiebung der Lichtquelle auf der Visierlinie unter unaufhörlichen kleinen seitlichen Bewegungen derselben die Scheinbewegung des Schattens, wie auch der Durchmesser desselben, bis zu einem Maximum zunimmt, bei welchem die Richtung der Scheinbewegung plötzlich wechselt, wonach die Scheinbewegung wieder immer weniger ausgiebig wird. Am eindeutigsten ersieht man dies aus dem oben angegebenen Differentialquotienten, da der Differentialquotient des Projektionskoeffizienten aus demselben nach oben angegebener Schablone erhalten werden kann. Werden in dem Ausdrucke für C Zähler und Nenner durch δ_0 dividiert, so kommt letztere Größe nur im Nenner vor, welcher die Form $\frac{\delta'}{\delta_0} - 1$ annimmt. Es geht aus derselben hervor, daß bei einer bestimmten Lage der Lichtquelle der Projektionskoeffizient mit einer Zunahme von δ_0 numerisch zunimmt, wenn δ' einen negativen Wert hat, und solange bei positivem Werte von δ' der Wert von δ_0 denselben nicht erreicht hat, während im Falle $\delta_0 > \delta' > 0$ der Projektionskoeffizient mit abnehmendem Werte von δ_0 zunimmt. Beim Vorhandensein mehrerer schattenwerfender Körper, von deren im letzten Medium entstehenden Bildern einige vor andere hinter dem dortselbst entstehenden Bilde der Lichtquelle gelegen sind, fällt somit die Scheinbewegung der ersteren um so geringer, die der letzteren um so ausgiebiger aus, je größer δ_0 ist.

Aus dem oben Gesagten geht hervor, daß zu einer exakten entoptischen Untersuchung vor allem ein konvergentes möglichst homozentrisches Strahlenbündel mit hinreichender spezifischer Helligkeit des durch dasselbe abgebildeten Lichtpunktes nötig ist. Eine vorzügliche Versuchsanordnung erhält man unter Anwendung der aplanatischen Ophthalmoskoplinse und der in einem Abstande von 5 bis 10 Meter aufgestellten Nernstspaltlampe, indem unmittelbar vor dem Spalt ein Loch von $^1/_2$ mm Durchmesser angebracht wird. Mit der am schärfsten gekrümmten Fläche dem Lichte zugekehrt, hält man zunächst die Linse in solchem Abstande vor das Auge, daß der Fokalpunkt einige Zentimeter vor demselben liegt. Bei seitlichen Verschiebungen der Linse machen alle entoptischen Schatten einschließlich der Grenzlinie des Feldes eine gleichsinnige Bewegung, welche um so größer ist, je weiter nach vorn der schattenwerfende Körper gelegen ist. Die scheinbare Verschiebung im Felde, die relative entoptische Parallaxe ist somit positiv, wenn der schattenwerfende Körper in der Hornhaut liegt, sonst negativ und um so stärker, je größer der Abstand des im letzten Mediums entstehenden Bildes des schattenwerfenden Körpers von der Austrittspupille des Auges ist. Das Vorzeichen derselben ist ersichtlicherweise dem der Listingschen Parallaxe entgegengesetzt, da bei seiner Versuchsanordnung das Auge bei feststehender Lichtquelle bewegt wird. Bei dieser Lage der Lichtquelle sind sowohl die durch Fettkügelchen auf der Hornhaut wie die durch die physiologische Struktur des Glaskörpers bedingten entoptischen Bilder hell mit dunklen Rändern. Nur wenn ausnahmsweise ein Luftbläschen auf der Hornhaut schwimmt, sieht man dasselbe als einen

schwarzen Schatten. Wird der Abstand der Linse vom Auge vermehrt, so werden im allgemeinen die dunklen Ränder schärfer hervortretend, indem das durch die schattenwerfenden Körper gehende Licht im letzten Medium eine stärkere Konvergenz erhält, aber gleichzeitig nimmt die scheinbare Größe derselben ab. Wird auf der anderen Seite die Linse dem Auge mehr genähert, so nimmt die scheinbare Größe der entoptischen Objekte zu, und die Scheinverschiebung der Fettkügelchen auf der Hornhaut wächst schnell zu, um, wenn das durch die Linse entworfene Lichtpünktchen hinter die Hornhaut gelangt ist, negativ zu werden. In demselben Augenblicke ändert sich auch der Charakter der entoptischen Erscheinung derselben auffällig, indem nunmehr ein schwarzer Schatten sichtbar wird. Mit einiger Übung kann man beliebig oft ein und dasselbe Fettkügelchen hell mit dunklem Rande oder schwarz sehen, je nachdem die Linse mehr nach vorn oder nach hinten verschoben wird. Ist es wohl gelungen, den schwarzen Schatten im Zentrum des entoptischen Feldes zu sehen, so kann man bei vorsichtiger Vermehrung des Abstandes der Linse den runden schwarzen Schatten bis zu einem Winkeldurchmesser von wenigstens 1^0 zunehmen sehen. Man findet dabei in der Regel auch, daß derselbe von einem helleren Ring umgeben ist, um welchen wiederum in günstigen Fällen mehrere, abwechselnd dunkle und helle, durch Interferenz entstandene Ringe gesehen werden können. Wegen der starken Vergrößerung des Feldes kann man im allgemeinen hierbei das Vorzeichen der relativen Parallaxe nicht mit Sicherheit bestimmen. Bei zentrierter Linse wird nämlich das Feld von der Öffnung derselben begrenzt, und wenn die seitliche Verschiebung hinreichend ist, um den Pupillenrand entoptisch wahrnehmen zu können, ist gewöhnlich das betreffende entoptische Bild längst aus dem Felde. Erst wenn die Linse dem Auge hinreichend genähert worden ist, um die Pupille wieder entoptisch sichtbar zu machen, wobei die Scheinbewegung derselben auch negativ geworden ist, läßt sich konstatieren, daß die Fettkügelchen auf der Hornhaut eine positive relative Parallaxe zeigen. Hierbei haben aber die im vorderen Teile des Glaskörpers gelegenen entoptisch sichtbaren Strukturdetails eine ähnliche Verwandlung durchgemacht, so daß dieselben, wenigstens die größeren unter ihnen, nunmehr undurchsichtig schwarz aussehen und eine starke gegensinnige Scheinbewegung sowie auch eine negative relative Parallaxe zeigen, während die weiter nach hinten liegenden fortwährend eine gleichsinnige Scheinbewegung und folglich auch eine positive relative Parallaxe haben, welche, als die Linse noch mehr dem Auge genähert wird, wieder derselben Veränderung unterliegt. Ist schließlich die Linse dem Auge ganz nahe gekommen, so sieht man nur die im hintersten Teile des Glaskörpers liegenden Objekte hell mit dunklem Saume, während die im vorderen Teile gelegenen das entoptische Bild der Pupille wie mit einem dunklen Netzwerk ausfüllen und dann und wann bei Bewegungen des Auges zwischenliegende Objekte zu großen dunklen, das Feld mit großer Schnelligkeit durchkreuzenden Schatten Anlaß geben. Tauscht man dann die Linse gegen eine schwächere aus, wobei wegen der geringen Öffnung keine Forderungen an Aplanatismus gestellt zu werden brauchen, so wird es bei der Abnahme des Feldes immer schwieriger, die entoptischen Bilder wiederzufinden. Bei wiederholten Versuchen gelingt es aber, zu konstatieren, daß man die gewöhnlich als fliegende

Mücken gesehenen Objekte, welche bei der ganzen Untersuchung stets eine sehr schwache gleichsinnige Scheinbewegung gemacht haben, nur hell mit dunklem Saume sehen kann.

Um mit Sicherheit die Scheinbewegung zu beobachten, braucht man nur das andere Auge offen zu halten. Bei Emmetropie, die nötigenfalls durch Vorsetzen des passenden Glases erzielt wird, sind aber die von der Linse selbst verursachten entoptischen Erscheinungen, wenn dieselbe ohne Drehung seitlich verschoben wird, vollkommen frei von Scheinbewegungen, und auch nach sorgfältiger Reinigung derselben findet sich immer ein Staubteilchen vor, das als Marke dienen kann, an welcher die Scheinbewegung auch der im hintersten Teile des Glaskörpers gelegenen Objekte sehr leicht konstatiert werden kann.

Bei der beschriebenen entoptischen Durchmusterung des Auges kann man, wie aus Obenstehendem erhellt, sofort durch die Scheinverschiebung entscheiden, ob das beobachtete Objekt vor oder hinter dem in demselben Medium entstehenden Bilde des leuchtenden Punktes gelegen ist. Dieselbe bietet deshalb das praktisch anwendbarste Mittel dar zur Bestimmung des Abstandes des schattenwerfenden Körpers von der Netzhaut, kann aber nicht zur genauen Tiefenlokalisation im hintersten Teile des Glaskörpers angewendet werden. Hierzu eignet sich aber vorzüglich die relative Parallaxe zur Linse. Hat man auf einer der Linsenflächen im Schnittpunkte mit der optischen Achse eine kleine Marke, so ist es ohne weiteres einleuchtend, daß, wenn die Linse seitlich verschoben wird, die vom leuchtenden Punkte zu dieser Marke gezogene Linie nach der Brechung im optischen System des eventuell bewaffneten Auges durch den Punkt gehen muß, welcher in diesem optischen System dem leuchtenden Punkte konjugiert ist. Es wird hierbei vorausgesetzt, daß die Linse bei großem Abstande des leuchtenden Punktes ohne Neigung seitlich verschoben wird, bzw. stets so gehalten wird, daß die Achse derselben durch den leuchtenden Punkt geht. Wenn man somit bei emmetropischer Refraktion dem Auge Konvexgläser mit wachsender Stärke vorsetzt und bei jeder Korrektion die entoptische Untersuchung unter Anwendung der aplanatischen Ophthalmoskoplinse macht, so sieht man die Parallaxe der im hintersten Teile des Glaskörpers liegenden Objekte zu der Marke auf der Linse stetig abnehmen, bis bei einer gewissen Korrektion dieselbe gleich Null geworden ist, indem der durch die Marke auf der Linse hervorgerufene Schatten eine Scheinbewegung von der gleichen Größe macht. Der Brennpunkt der dem Auge vorgesetzten Linse ist dann der scheinbare Ort des schattenwerfenden Körpers. Da bei dieser Untersuchung der Abstand der aplanatischen Linse bedeutungslos ist, so kann man denselben je nach den vorliegenden Verhältnissen so wählen, daß man ein großes Feld auf einmal sichtbar hat, oder daß andere, die Beobachtung störende Objekte unsichtbar werden.

Die kompliziertere Brewstersche Methode zur Tiefenlokalisation dürfte mit Vorteil durch die beiden beschriebenen ersetzt werden können. Man benutzt bei derselben zwei leuchtende Punkte, welche zwei entoptische Schatten entwerfen, deren Winkelabstand, ebenso wie derjenige der beiden entoptischen Pupillenbilder, gemessen wird. Wenn man den Abstand der doppelten Lichtquelle vom Auge kennt, so braucht nur das Verhältnis der

betreffenden Winkelabstände gemessen zu werden, indem δ' aus den Konstanten des Auges berechnet wird. Da die Winkelabstände sich zueinander wie die entsprechenden Projektionskoeffizienten verhalten, und der Projektionskoeffizient, wenn die Pupille das Projektionszentrum darstellt, durch die bekannte Lage der Austrittspupille bestimmt ist, so ergibt die Messung des Verhältnisses der Winkelabstände tatsächlich den Projektionskoeffizienten bei der Anwendung des beobachteten entoptischen Objektes als Projektionszentrum, und man erhält aus dem so ermittelten Werte von C den gesuchten Wert von δ_0. Werden als Lichtquellen zwei feine Löcher in einer Platte angewendet, welche in der ersten Fokalebene des Auges gelegen ist, während man durch die beiden Löcher gegen eine sehr hell erleuchtete Fläche hinsieht, so kann man auf derselben die Abstände der Doppelbilder markieren, wobei sich der Abstand der Doppelbilder des beobachteten Objektes zu demjenigen der Doppelbilder eines Punktes des Pupillenrandes wie δ_0 zum reduzierten Abstande der Austrittspupille von der Netzhaut verhält. Bei anderen Versuchsanordnungen kann es vorteilhafter sein, das andere Auge zur Projektion anzuwenden.

Die entoptische Untersuchung stellt eine exakte Methode dar, mit welcher entschieden werden kann, ob die bei der fokalen Beleuchtung sichtbare Sternfigur der Linse des Auges durch wirkliche Diskontinuitäten des Brechungsindex oder nur durch die Form der Isoindizialflächen bedingt wird. Im ersteren Falle müßte nämlich diese Sternfigur mit Notwendigkeit entoptisch wahrgenommen werden können, was aber unter physiologischen Verhältnissen nie zutrifft.

In das Gebiet der Dioptrik gehören auch die drei Purkinjeschen Methoden zur Beobachtung des Schattens der Netzhautgefäße. Nach einer Methode wird starkes Licht, am besten Sonnenlicht, mit einer Sammellinse von kurzer Brennweite auf einen Punkt der Sklera konzentriert, wobei das durch die Augenhäute gehende Licht diffus im Innern des Bulbus ausstrahlt, und der beleuchtete Punkt somit die Lichtquelle darstellt. Wenn es sich nicht um die Beobachtung der feinsten Gefäßverzweigungen handelt, wird der Versuch am besten unter Anwendung einer der nunmehr in der ophthalmologischen Praxis gebräuchlichen Durchleuchtungslampen ausgeführt. Da sich der Schatten bei einer Verschiebung der Lichtquelle in umgekehrter Richtung bewegen muß, die scheinbare Bewegung aber der wirklichen entgegengesetzt ist, so ist dieselbe gleichsinnig mit der Bewegung der Lichtquelle. Wird diese Verschiebung ebenso wie die scheinbare Winkelbewegung des Schattens gemessen, so läßt sich daraus nach dem Vorgange H. Müllers ein approximatives Maß des Abstandes der Gefäße von der lichtperzipierenden Schicht gewinnen. Bei einer anderen Methode wird in einigem Abstande von der Visierlinie eine Lichtquelle hin und her bewegt, wobei das auf dem Augenhintergrunde entstehende Bild derselben die Lichtquelle darstellt, welche den Schatten wirft. Wird z. B. die Lichtquelle temporalwärts von der Visierlinie gehalten, wobei sich dieselbe bei vertikalen Bewegungen in einer Sagittalebene verschiebt, so macht das auf dem Augenhintergrund entstehende Bild die entgegengesetzte Bewegung, während, wenn dieselbe der Visierlinie genähert wird, letzteres Bild mehr nach hinten geht und hierbei eine Bewegung macht, welche vom hinteren Pole des Auges aus

gesehen, eine gleichsinnige Richtung mit der der Lichtquelle hat. Da nun, wie aus der ersten Methode hervorgeht, die scheinbare Bewegung des Schattens gleichsinnig mit der Bewegung des auf dem Augenhintergrund entstehenden Bildes sein muß, so ist dieselbe in der Tangentialebene gleichsinnig, in der Sagittalebene ungleichsinnig in bezug auf die Bewegung der Lichtquelle. Die letzte Methode besteht in der Herumführung eines kleinen leuchtenden Punktes, welcher sich in einer nahe der Pupille gelegenen Ebene bewegt. Man kann hierzu durch ein kleines Loch nach einer hellen Fläche sehen oder auch mit einer aplanatischen Lupe von kurzer Brennweite und großer Öffnung das Bild einer hellen Lichtquelle in die Nähe der Eintrittspupille des Auges entwerfen. Bei der letzteren Versuchsanordnung kann man auch nach oben beschriebener Methode die relative Parallaxe zur Linse benutzen, um ein approximatives Maß der Entfernung der Gefäße von der lichtperzipierenden Schicht zu erhalten.

Endlich stellt die entoptische Scheinverschiebung das Mittel dar, mit welchem die Natur des sogenannten Maxwellschen Fleckes untersucht werden kann. Ich habe unter Anwendung der beiden letzterwähnten Purkinjeschen Methoden[1]) bewiesen, daß dieser Fleck in zwei getrennte Erscheinungen zerfällt, nämlich die entoptische Macula, welche auch bei der zweiten der oben erwähnten Methoden vollkommen frei von Scheinverschiebung ist, und die entoptische Fovea, welche den in der anatomischen Fovea auf dieselbe Weise wie in einer Konkavlinse entstehenden Schatten darstellt. Die physiologischen Eigentümlichkeiten, welche die Beobachtung durch die Flüchtigkeit und Veränderlichkeit der Scheindrücke erschweren, machen es in manchen Fällen wünschenswert, eine im Auge unbewegliche Marke zur Konstatierung der Scheinbewegung zu haben. Eine solche erhält man in dem Nachbilde, das man sich durch Fixierung des einen Endes des Nernstspaltes verschafft. Die Untersuchung der entoptischen Fovea mit verschiedenfarbigem Lichte hat eine bedeutende Chromasie bei der Brechung des Lichtes in derselben sichergestellt, welche, da die Fovea die einzige zerstreuende Fläche im optischen System des Auges ist, das einzige Mittel darstellt, mit welchem die chromatische Vergrößerungsdifferenz bei der Abbildung im Auge günstig beeinflußt wird. Auch zur Untersuchung der Natur der Haidingerschen Polarisationsbüschel wurde die entoptische Scheinbewegung angewendet.

IV. Messungsmethoden.

1. Optometrische Methoden.

Die Messung der optischen Einstellung des Auges, die Optometrie, kann einerseits unter Anwendung eines der oben S. 113ff. abgehandelten Kriterien der scharfen optischen Einstellung, andererseits aber auch ohne Inanspruchnahme einer mit dem untersuchten Auge gemachten Beobachtung vorgenommen werden. Die auf ersterem Prinzip basierten Methoden, welche

1) Die Farbe der Macula centralis Retinae. Arch. f. Ophth. LXII, 1. S. 1. 1905. Zur Maculafrage. Ebenda LXVI, 1. S. 141. 1907.

eine relativ aktive Mitwirkung des beobachteten Auges voraussetzen, seien als subjektiv, die übrigen als objektiv bezeichnet.

Unter den subjektiven optometrischen Methoden steht heute noch die Donderssche obenan. Dieselbe besteht in der gleichzeitigen Ermittelung der Refraktion und Sehschärfe bei großem Abstande der Sehproben unter Vorsetzen von Gläsern vor das untersuchte Auge. Da nämlich bei dem gebräuchlichen Abstande des Probeglases vom Auge δ_f (siehe oben S. 49ff) hinreichend klein ist, um praktisch vernachlässigt werden zu können, so ist der Fokalpunktwinkel gleich der Winkelgröße der Sehprobe im vorderen Hauptpunkte des vorgesetzten Glases und folglich durch die Größe und den Abstand der Sehprobe bestimmt. Da es sich weiter um die Ermittlung des Grenzwertes der Refraktion handelt, bei welchem die Akkommodation vollständig entspannt ist, so besteht die Methode in der Aufsuchung der in algebraischem Sinne maximalen Konvergenz des in das Auge einfallenden Strahlenbündels, welche mit der maximalen Sehschärfe vereinbar ist. Das stärkste positive bzw. das schwächste negative Glas, mit welchem diese Sehschärfe erhalten werden kann, gibt somit den Korrektionswert der Refraktion an, und die mit diesem Glase erhaltene Schschärfe ist die absolute Sehschärfe des Auges, welche durch den kleinsten Fokalpunktwinkel bei Akkommodationsruhe charakterisiert ist.

Auf die Details der Technik dieser Untersuchung hier näher einzugehen, würde viel zu weit führen, da dieselbe in Fällen wo ein vorhandener Astigmatismus mit ausgeprägter Asymmetrie kompliziert ist, zu den subtilsten und schwierigsten Untersuchungen gehört, die es überhaupt gibt. Nur auf einige Hauptpunkte, welche erfahrungsgemäß sehr oft ungenügende Beachtung finden, soll hier eingegangen werden. Was zunächst die Benutzung der Sehschärfe als eines Indikators der scharfen optischen Einstellung betrifft, so ist man sehr oft zufrieden, wenn man die Sehschärfe 1 nach der Nomenklatur der angewendeten Sehprobentabelle erhalten hat. Diese stellt aber allgemein nicht den normalen Wert dar, sondern derselbe liegt meistens wesentlich höher, und eine Untersuchung kann ersichtlicherweise nie als die maximale Schschärfe ergebend angesehen werden, wenn nicht die Sehprobentafel Buchstaben enthält, welche bei dieser maximalen Sehsehärfe nicht gelesen werden können. Weiter ist es, um den Einfluß der Veränderung der Korrektion auf der Sehschärfe möglichst deutlich zu machen, wünschenswert, daß die Intervallen an der Sehprobentafel nicht zu groß sind. Die nach dem Dezimalsystem angeordneten Tabellen verdienen in dieser Hinsieht den Vorzug, da zwischen 0,5 und 1,0 vier intermediäre Masse vorhanden sind, während z. B. an den Sehprobentafeln von Snellen nur ein intermediäres Maß zwischen 6/12 und 6/6 gelegen ist. Man muß aber erstere Tafeln in einem solehen Abstande aufhängen, daß die maximale Sehschärfe des untersuchten Auges durch eines der angegebenen intermediären Maße bestimmt wird, wenn man den Vorteil ausnutzen will. Bei guter Sehschärfe eignet sich hierzu ein Abstand von 7 bis 8 m am besten. Der durch den Dezimalbruch angegebene Wert der Sehschärfe ist dann mit diesem Abstande zu multiplizieren und durch den der Berechnung der Tafel zugrunde gelegten Abstand zu dividieren, um den Wert der absoluten Sehschärfe zu erhalten. Endlich ist besonders Gewicht darauf zu legen, daß der Effekt einer Ände-

rung des Glases nie als eine Verbesserung oder Verschlechterung der Sehschärfe angenommen wird, ohne daß eine Zeile gelesen wird, welche früher nicht gelesen werden konnte bzw. das entgegengesetzte Verhalten stattfindet. Hat man die Refraktion in einem von meßbarem Astigmatismus freien Auge mit guter Sehschärfe bis auf $^1/_4$ dptr bestimmt, so erhält man bei der Hinzufügung eines positiven Glases von $^1/_2$ dptr eine Verschlechterung der Sehschärfe, bei welcher dieselbe gewöhnlich bis auf die Hälfte des früheren Maßes herabsinkt. Nur habituell unkorrigierte Myopen, welche das Sehen mit anderen Querschnitten der kaustischen Flächen durch lange Zeit eingeübt haben, zeigen hiervon eine Ausnahme, aber auch bei solchen sinkt die Sehsehärfe wenigstens um ein paar Zehntel. In den Fällen, wo die maximale Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels nicht durch ein scharfes Gefälle der Sehschärfe gekennzeichnet ist, liegt fast ausnahmsweise — gute Sehschärfe vorausgesetzt — Astigmatismus vor, wobei die wirkliche Refraktion erst nach richtiger Korrektion dieses Fehlers erhalten werden kann.

Wie aus dem oben S. 34 dargelegten Baue des in einem astigmatischen Auge gebrochenen Strahlenbündels hervorgeht, darf man bei den geringen Graden — und diese sind jedenfalls binnen gewisser Grenzen als physiologisch anzusehen — nicht erwarten, die Richtung der abbildbaren Linien und damit die Orientierung der Hauptschnitte ermitteln zu können, bevor man nicht die ganze kaustische Fläche durch Vermehrung der Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels vor die Netzhaut verlegt hat. Die Nichtbeachtung dieses Sachverhaltes und der Glaube an das Sturmsche Konoid ist eine häufige Ursache des Übersehens eines vorhandenen Astigmatismus, woraus wieder wegen der bei unkorrigiertem Astigmatismus unvermeidlichen Akkommodationsspannung ein falsches Resultat der Refraktionsbestimmung die Folge wird. Hat man aber auf diese Weise unter Anwendung der Sternfigur die Richtung einer abbildbaren Linie gefunden, so ist man auch sicher, daß dieselbe die Orientierung des am stärksten brechenden Hauptschnittes des Auges angibt. Man hat dann abermals die Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels zu vermindern, bis die bisher erreichte maximale Sehschärfe wieder konstatiert wird. Der Grad des Astigmatismus wird dann durch dasjenige Konkavzylinderglas angegeben, mit welchem die maximale Sehschärfe erhalten wird, während die Achse senkrecht auf der gefundenen abbildbaren Linie steht. Daß nur die maximale Sehschärfe, nicht aber die Deutlichkeit der Linien in der Sternfigur, ausschlaggebend ist, geht aus der Beschaffenheit der kaustischen Fläche hervor. Nachdem auf diese Weise ein preliminärer Wert des Astigmatismus gefunden worden ist, hat man wieder unter Anwendung der bezüglichen Zylinderkorrektion die Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels zu vermehren, wobei fast stets ein höher liegendes Maximum erhalten wird als früher. In schwierigen Fällen kann es, um ein genaues Resultat zu erhalten, nötig sein, die ganze Prozedur mit Ausgang von der nunmehr gefundenen Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels zu wiederholen.

Das Untersuchungsergebnis, insbesondere auch der Grad des Astigmatismus und die Orientierung der Hauptschnitte kann binnen gewisser Grenzen von der Pupillenweite beeinflußt werden, so daß bei verschiedener Pupillen-

weite vorgenommene Untersuchungen manchmal auffallend abweichende Resultate ergeben können. Der im normalen Auge vorhandene und durch die subjektive Stigmatoskopie bewiesene Astigmatismus der Aberration bedingt, daß die für die optische Abbildung vorteilhaftesten Querschnitte der kaustischen Fläche nicht bei vollkommenem Anastigmatismus auf der Achse erhalten werden. In welchem Grade dieser Einfluß der astigmatischen Aberration sich geltend macht, hängt aber, wie überhaupt ein jeder Einfluß der Aberration, von der Pupillengröße ab.

In der hier kurz skizzierten Dondersschen Methode spielt sowohl der Nachweis der erhältlichen Sehschärfe wie namentlich auch der große Abstand und die Möglichkeit, die schließliche Korrektion der Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels binokulär vorzunehmen, eine nicht unwesentliche Rolle. Dadurch, daß der Untersucher wirklich mit der Sehschärfe kontrollieren kann, ob eine Verbesserung oder Verschlechterung der optischen Einstellung eintritt, gewinnt die Methode einen reellen Vorzug vor denjenigen subjektiven Methoden, bei welchen andere Kriterien der optischen Einstellung angewendet werden. Der große Abstand ist aber bei Personen, welche keine Übung in der Entspannung der Akkommodation haben, fast unumgänglich zur Ermittlung der wirklichen Fernpunkteinstellung, und die binokuläre Untersuchung bietet ein manchmal willkommenes Mittel dar, diese Entspannung zu erleichtern.

Aus analogen Gründen ist bei der zur Untersuchung der Akkommodationsbreite nötigen Ermittlung der in algebraischem Sinne minimalen Refraktion des Auges sowohl die durch die Sehschärfe sich darbietende Kontrolle der optischen Einstellung wie auch jedes zur Verfügung stehende Mittel zu benutzen, mit welchem die Akkommodationsanstrengung befördert wird. Als solches dient in erster Linie ein kurzer Objektabstand, und man könnte deshalb in den meisten Fällen den Nahepunkt einfach durch Ermittlung des kürzesten Abstandes aufsuchen, in welchem feinster Druck gelesen werden kann, wenn der Druck hinreichend fein wäre, um im angewendeten Abstande der maximalen Sehschärfe des Auges zu entsprechen. Da dies aber in den meisten Fällen nicht der Fall ist, so hat man nach einem Versuche, durch welchen ein approximativer Wert erhalten worden ist, den Nahepunkt durch Vorsetzen von passenden Gläsern so weit vom Auge zu verlegen, daß der feinste zugängliche Druck einer wenigstens nicht wesentlich geringeren Sehschärfe als der gefundenen maximalen entspricht, wonach der Nahepunktabstand des so bewaffneten Auges gemessen wird. Auf jeden Fall hat man bei der Verwertung des Ergebnisses der Untersuchung zu berücksichtigen, daß die Tiefe der optischen Abbildung bei der die Akkommodation begleitenden Pupillenverengerung gesteigert wird und eine Fehlerquelle darstellt, deren Einfluß nicht überblickt werden kann.

Weitere subjektive Methoden der Optometrie sind teils durch einen anderen Indikator der optischen Einstellung teils durch andere Mittel zur Variation der Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels charakterisiert. Was die Kriterien der optischen Einstellung betrifft, sei auf das oben Gesagte hingewiesen und soll hier nur darauf aufmerksam gemacht werden, daß, wenn ein anderer Indikator als die Sehschärfe angewendet wird, die Abhängigkeit der Bildgröße von der Konvergenz des einfallenden Strahlen-

bündels und von der Akkommodation relativ bedeutungslos ist, während, wenn die Sehschärfe als Kriterium der optischen Einstellung angewendet wird, die Forderung aufgestellt werden muß, daß die Bildgröße nicht bei einer Akkommodationsanstrengung vermehrt wird, und, wenn die Methode auch zur Messung der absoluten Sehschärfe dienen soll, daß die Abhängigkeit der Bildgröße von der Konvergenz des in das Auge einfallenden Strahlenbündels eine solche ist, daß die lineare Größe der Sehprobe dem Fokalpunktwinkel proportional ist.

Während somit in ersteren Fällen fast jede beliebige Einrichtung angewendet werden kann, mit welcher die Konvergenz des in das Auge einfallenden Strahlenbündels innerhalb hinreichend weiter Grenzen verändert werden kann, sind im letzteren Falle nur ganz bestimmte optische Einrichtungen möglich. Dieselben können unter drei Kategorien gruppiert werden, indem die Variation der optischen Einstellung entweder durch einen Wechsel von Gläsern oder durch die Verschiebung des Objektes oder aber durch Veränderung des Abstandes zweier Komponenten eines optischen Systems erreicht wird.

In die erste Gruppe gehören zunächst diejenigen Instrumente, welche als Glaswechselmaschinen den Brillenkasten bei der Donderssehen Methode ersetzen sollen. Von denselben ist hier nur hervorzuheben, daß, wenn das untersuchte Auge keine Übung in der Entspannung der Akkommodation oder in der Benutzung optischer Instrumente hat, das Resultat erfahrungsgemäß weniger sicher ist als mit dem Brillenkasten. Dies dürfte zum Teil darauf beruhen, daß die meisten Menschen, sobald sie in optische Instrumente sehen sollen, die Vorstellung des scharfen Sehens unwillkürlich mit einer Akkommodationsanspannung verknüpfen, zum Teil aber auch darauf, daß die Zentrierung der Linsen auf die Visierlinie des untersuchten Auges nicht so leicht überwacht werden kann. Die sogenannten Refraktionsophthalmoskope, welche in der ophthalmologischen Praxis wegen der leichteren Transportabilität eine gewisse Anwendung als Ersatz des Brillenkastens finden, haben außerdem den Nachteil, daß bei mangelnder Zentrierung und kleinem Durchmesser der Linse ein Teil der Pupille außer Funktion gesetzt werden kann. In Optometern von dieser Kategorie könnte theoretisch der Abstand der Sehprobentafel beliebig klein gemacht werden, wenn der hintere Hauptpunkt des angewendeten optischen Systemes mit dem vorderen Brennpunkte des Auges zusammenfiele, da bei $\delta_f = 0$ der Fokalpunktwinkel gleich der im vorderen Hauptpunkte des vorgeschalteten Systems gemessenen Winkelgröße des Objektes ist. Da aber δ_f im allgemeinen nicht exakt gleich Null ist, und da es, je kürzer der Objektabstand, um so notwendiger ist, daß der vordere Hauptpunkt der vorgesetzten Gläser stets genau auf derselben Stelle liegt, so empfiehlt es sich, die reduzierte Sehprobentafel in der Fokalebene einer Lupe anzubringen und die optische Einstellung durch vorgesetzte Gläser zu variieren. Im zweiten Brennpunkte des vorgesetzten Glases entsteht dann das vom Auge gesehene Bild. Da der Vergrößerungskoeffizient hierbei laut der Formel (3e) S. 13 vom gegenseitigen Abstande der Teilsysteme unabhängig ist, so wird durch denselben kein Fehler eingeführt. Nach diesem Prinzipe sind auch Optometer konstruiert worden, welche sich aber wegen der gewöhnlich eintretenden Akkommo-

dationsanspannung praktisch nicht bewährt haben. Diese wird bei solchen Konstruktionen auch durch die Krümmung des Bildfeldes veranlaßt, indem man tatsächlich, um die Randteile des Bildes scharf sehen zu können, ein solches Glas wählen muß, daß die zentralen Teile nur unter Anwendung der Akkommodation auf der Netzhaut optisch eingestellt werden können.

Unter den Methoden, bei welchen der Abstand des Objektes verändert wird, gibt es eine, welche zur Voruntersuchung manchmal praktisch anwendbar ist, nämlich die direkte Messung des Fernpunktabstandes bei wirklicher oder durch Vorsetzen von Gläsern künstlich erzielter Myopie. Da aber hierbei die Netzhautbildgröße, wie aus der allgemeinen Formel für die Vergrößerung eines mit dem Auge kombinierten Systems hervorgeht, bei abnehmendem Objektabstande und zunehmender Akkommodation zunimmt, worin an und für sich eine Veranlassung zur Akkommodation liegt, so ist es einleuchtend, daß die Zuverlässigkeit der Messungsresultate zu wünschen übrig lassen muß, was auch von der Erfahrung bestätigt wird. Theoretisch einwandfrei ist dagegen, soweit es sich nur um die Gesetze erster Ordnung handelt, diejenige Optometerkonstruktion, bei welcher eine Lupe angewendet wird, deren hinterer Brennpunkt möglichst mit dem vorderen Brennpunkte des Auges zusammenfällt, während die Variation der Einstellung durch Verschiebung der in entsprechend verkleinertem Maßstabe photographisch reproduzierten Sehprobentafel bewirkt wird. Da hierbei $\Delta_f = 0$ ist, so erhält man unabhängig von der Einstellung den Fokalpunktwinkel durch Division der Objektgröße mit der Brennweite der Lupe (S. 55), wozu noch kommt, daß der Korrektionswert der Ametropie im zweiten Brennpunkte der Lupe dem Abstande des Objektes vom ersten Brennpunkte proportional ist, so daß eine gleichmäßige Skala jenen Wert angibt. Leider ist aber die Akkommodation auch bei solchen Instrumenten, wie mich langjährige Versuche gelehrt haben, eine sehr selten ausbleibende Fehlerquelle.

Als Optometer zur gleichzeitigen Bestimmung der Sehschärfe können solche Instrumente angewendet werden, in welchen die optische Einstellung durch Änderung des gegenseitigen Abstandes zweier Teilsysteme bewirkt wird, wenn der zweite Brennpunkt des zweiten Teilsystems mit dem vorderen Brennpunkte des Auges zusammenfällt, und der Abstand des Objektes vom ersten Teilsystem durch die Einstellung nicht merkbar beeinflußt wird. Der erste Brennpunkt des ersten Teilsystems ist dabei dem vorderen Brennpunkte des Auges konjugiert, und der Vergrößerungskoeffizient ist in diesen Punkten, wie schon oben bemerkt wurde, von dem gegenseitigen Abstande der beiden Teilsysteme unabhängig. Folglich ist dies auch mit dem angulären Vergrößerungskoeffizienten der Fall, was damit gleichbedeutend ist, daß der Fokalpunktwinkel unabhängig von der Einstellung des Vollsystems in konstantem Verhältnis zu der im ersten Fokalpunkte des ersten Teilsystems gemessenen Winkelgröße des Objektes steht. Auf diese Weise können astronomische Fernrohre und die jetzt gebräuchlichen Prismenfernrohre als Optometer angewendet werden. Daß die Skala in solchen Konstruktionen gleichmäßig ist, erhellt schon daraus, daß, wenn das durch das erste Teilsystem erzeugte Bild als Objekt betrachtet wird, dieselben Verhältnisse vorliegen wie bei der eben beschriebenen Methode mit veränderlichem Objektabstande. Zu dieser Gruppe gehört auch ein von mir konstruiertes

Instrument, wo der anguläre Vergrößerungskoeffizient im vorderen Brennpunkte des Auges gleich eins mit positivem Vorzeichen ist. Dieser Punkt ist somit der zweite Hauptpunkt des Instrumentes, woraus folgt, daß die optischen Bilder von hinreichend entfernten Objekten dieselbe Lage und Größe haben wie mit den bei der Donderssehen Methode angewendeten Gläsern. Die Bedingung hierfür ist ersichtlicherweise, daß die beiden Teilsysteme, deren gegenseitiger Abstand bei der optischen Einstellung verändert wird, die gleiche Brechkraft mit entgegengesetztem Vorzeichen haben. Eine passende Lage erhält der zweite Hauptpunkt des Vollsystems, wenn man denselben mit dem zweiten Hauptpunkt der letzten Linse des Instrumentes zusammenfallen läßt. Diesen beiden Bedingungen wird unter Anwendung von drei Linsen genügt, wenn man in den Gleichungen (4) S. 13

$$-D_1 = D_2 = \frac{1}{\delta_2}$$

setzt, wobei dieselben das Resultat

$$D_{13} = D_3 + \delta_1 D_2^{\,2} \qquad H_{13} = \frac{1}{D_2} \qquad H'_{13} = 0$$

ergeben, aus welchem u. a. hervorgeht, daß die Skala gleichmäßig ist, und daß man durch die Wahl von D_3 in seiner Hand hat, den Nullpunkt derselben in passenden Abstand von der mittleren Linse zu verlegen. Leider gilt von diesem Instrumente dasselbe wie von allen anderen Optometern, daß die Akkommodation leichter als bei der Donderssehen Methode ins Spiel kommt. Auch nach Korrektion des Astigmatismus der schief einfallenden Strahlenbündel durch zweckentsprechende Durchbiegung der Augenlinse, welche Arbeit Herr Dr. v. Rohr vor kurzem mit gütiger Aufopferung von Zeit und Mühe durchgeführt hat, scheint sich dieser Übelstand, wenn es sich nicht um geübte Augen handelt, nicht beseitigen zu lassen.

In das Gebiet der subjektiven Optometrie gehört auch die Bestimmung der chromatischen Fokusdifferenz des Auges. Wenn man mit einem Fernrohre oder mit einer beliebigen Optometerkonstruktion die Fernpunkteinstellung des Auges unter Anwendung monochromatischen Lichtes verschiedener Wellenlänge vornimmt, so erhält man allgemein verschiedene Resultate, aus welchen, wenn die Dispersion der Glassorten und die übrigen Konstruktionselemente der Instrumente bekannt sind, die chromatische Fokusdifferenz des Auges berechnet werden kann. Am einfachsten verfährt man hierbei nach der ursprünglichen Methode Fraunhofers indem man zwei Farben wählt, für welche das angewendete Instrument achromatisch ist, wobei die Einstellungsänderung des Instrumentes direkt den Refraktionsunterschied des Auges für die beiden Farben angibt. Hier sei nur bei dieser Gelegenheit darauf aufmerksam gemacht, daß man, um reine Farben kurzwelligen Lichtes zu erhalten, im allgemeinen entweder von einer wiederholten prismatischen Zerlegung des Lichtes oder von Lichtfiltern Gebrauch machen muß.

Unter den objektiven Methoden der Optometrie ist die Refraktionsbestimmung im aufrechten ophthalmoskopischen Bilde die älteste und zugleich diejenige, welche der Donderssehen Methode am nächsten steht. Mit dieser teilt sie auch den Nachteil der Abhängigkeit von der

Akkommodation des beobachtenden Auges, so daß die Zuverlässigkeit der Resultate von der Übung und Geschicklichkeit des Untersuchers beeinflußt wird. Die Methode besteht in der Aufsuchung des algebraischen Maximalwertes der Brechkraft D_1 (S. 60) der Linse, mit welchem der Beobachter die maximale Sehschärfe auf dem Augenhintergrunde des beobachteten Auges hat. Da aber die Refraktion in verschiedenen Teilen des Augenhintergrundes sehr verschiedene Werte haben kann, und da besonders die Papille wegen der dort vorhandenen Niveauunterschiede weniger geeignet als Einstellungsobjekt ist, so hat man hierzu kleine Gefäßverzweigungen zu wählen, welche zwischen Papille und Macula, der letzteren so nahe wie möglich, verlaufen. Bei vorhandenem Astigmatismus gelingt es in vielen Fällen dem geübten Untersucher den Unterschied der Refraktion zu konstatieren und unter günstigen Umständen richtig zu messen, wenn nacheinander Gefäßverzweigungen als Einstellungsobjekte gewählt werden, welche in den beiden Hauptschnitten verlaufen. Auf der anderen Seite wirkt ein im beobachteten Auge vorhandener Astigmatismus durch die Undeutlichkeit der Bilder manchmal so erregend auf die Akkommodation des Untersuchers ein, daß es nicht gelingt, einen richtigen Wert der Refraktion zu erhalten, was besonders bei Komplikation des Astigmatismus mit ungewöhnlichen Graden von Asymmetrie des Auges der Fall zu sein scheint. Das gefundene Glas ergibt unter allen Umständen nur die algebraische Summe der Korrektionswerte der Refraktion des beobachtenden und des beobachteten Auges. Besonders bei hohen Werten der Brechkraft dieses Glases muß bei der Verwertung des Untersuchungsergebnisses in Rechnung gezogen werden, daß der Abstand desselben vom beobachteten Auge größer als der gewöhnliche Brillenabstand ist, wodurch ein nicht unbedeutender Unterschied vom gewöhnlichen Korrektionswerte resultiert, welcher sich nicht exakt bestimmen läßt, da der im Momente der Refraktionsbestimmung angewendete Abstand nicht hinreichend genau ermittelt werden kann. Es folgt hieraus, daß die Genauigkeit der Methode mit numerisch zunehmender Stärke des angewendeten Glases abnimmt. Noch mehr ist dies ersichtlicherweise der Fall, wenn die Konstruktion des Augenspiegels eine Schiefstellung des Glases notwendig macht, so daß, wenn der Spiegel nicht schief gestellt ist, nur die schwächsten Gläser ein einigermaßen zuverlässiges Resultat angeben können.

Zur Messung von Niveauunterschieden im Augenhintergrunde eignet sich die Refraktionsbestimmung vorzüglich, wenn die beiden Punkte, deren Refraktionsunterschied bestimmt wird, in nicht zu großem Winkelabstande voneinander liegen, da ja die Fehlerquellen bei beiden Bestimmungen annähernd dieselben sind, wobei eine gewisse Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, daß dieselben ohne wesentliche Bedeutung für den gesuchten Refraktionsunterschied sind. Die Messung der Refraktion in verschiedenen Teilen der Pupille ergibt zwar bei vorhandener Asymmetrie bedeutenden Grades und bei abnormer (negativer) Aberration Unterschiede von mehreren Dioptrien, kann aber in den typisch bestgebauten Augen nicht mit Vorteil angewendet werden, weil das Maximum der Refraktion dem Minimum zu nahe liegt. Dagegen ist es nicht schwer, insofern die entsprechende Einwirkung auf das Messungsresultat zu konstatieren, als dasselbe, ebenso wie die Schärfe des Augenhintergrundbildes, in dem Maße

schlechter wird, als man sieh vom Zentrum der optisehen Zone der Pupille entfernt. Wenn die Pupille nieht künstlich erweitert ist, so bewirkt gewöhnlich die bei der Aufsuehung der in der Nähe der Macula verlaufenden Gefäßverzweigungen eintretende Pupillenkontraktion, daß zwisehen dem Hornhautreflex und dem Irisrande kein überschüssiger Raum eine Wahl gestattet, bei erweiterter Pupille bietet sieh aber hinreichende Gelegenheit, zu konstatieren, daß man nur in der nächsten Nähe des Hornhautreflexes die maximale Bildsehärfe in der Maeulagegend erreieht und die Refraktion dortselbst mit Sicherheit bestimmen kann. Das beste Resultat erhält man mit der oben beschriebenen zentrischen Ophthalmoskopie, bei welcher der Hornhautreflex durch den Vollsehatten des Spiegelloehes ausgesehaltet wird.

Allen bisher vorgeschlagenen Methoden zur Messung der Refraktion durch die Bestimmung des Ortes des umgekehrten ophthalmoskopisehen Bildes haftet der Naehteil an, daß man vom angewendeten Teile der Pupille des beobaehteten Auges eigentlieh nur weiß, daß es nicht derjenige sein kann, wo die Refraktion bestimmt werden sollte, da der Hornhautreflex der Untersuehung der Maculagegend im Wege steht, wenn das Bild der Pupille des beobachtenden Auges im Zentrum der Pupille des beobaehteten Auges liegt. Hierzu wäre die zentrisehe reflexlose Ophthalmoskopie erforderlich. Von den zur Bestimmung des Ortes des ophthalmoskopischen Bildes angewendeten Mitteln zeichnet sich das durch Sehmidt-Rimpler eingeführte vor den übrigen dadurch aus, daß das auf dem Augenhintergrunde entstehende Bild eines vor der Lichtquelle befindliehen passenden Gitters als Einstellungsobjekt für das beobaehtende Auge dient. Da der Abstand dieses Bildes vom Augenspiegel bekannt ist, so braucht man nur sein Auge für denselben einzustellen und den Abstand der Linse in dem Augenblieke zu messen, wo das Bild des Gitters auf dem Augenhintergrunde die größte Sehärfe zeigt, um über die nötigen Daten zur Berechnung der Refraktion zu verfügen.

Die schon oben S. 106 gewürdigte Methode der Skiaskopie, bei welcher unter Vorsetzen versehiedener Gläser die optisehe Einstellung des beobachteten Auges verändert wird, bis die Bewegung des Lichtseheines nieht mehr angibt, daß der Einstellungspunkt desselben vor oder hinter dem beobachtenden Auge gelegen ist, stellt die neben der Refraktionsbestimmung im aufrechten Bild vorzugsweise angewendete Methode der objektiven Optometrie dar. Über den Wert derselben und der oben angegebenen Modifikationen ist hier weiter nichts hinzuzufügen, als daß sie vor der Methode des aufrechten Bildes den Vorzug der Unabhängigkeit von der Akkommodation des beobaehtenden Auges hat, während es auf der anderen Seite nieht mit derselben Sieherheit ausgeschlossen erscheint, daß das beobachtete Auge die Akkommodation anspannen könne, was erfahrungsgemäß im aufreehten Bild mit seltenen Ausnahmen nur momentan vorkommt. Was die Teehnik der Methode betrifft, so ist es einleuchtend, daß ein geringer Abstand des Einstellungspunktes des beobachteten Auges vom beobaehtenden Auge einen um so kleineren Refraktionsunterschied des ersteren Auges bedeutet, je größer der Abstand zwisehen beiden Augen ist. Die Methode wird somit unter sonst gleiehen Umständen empfindlicher, wenn dieser Abstand vergrößert wird, und es wird gleichzeitig weniger wichtig, den Abstand

vollkommen genau einzuhalten. Auf der anderen Seite wird die Methode sehr unbequem, wenn der Abstand so vergrößert wird, daß man nicht die vorgesetzten Gläser bequem in der Hand halten kann, wobei die in denselben entstehenden Lichtreflexe durch kleine Neigungen der Gläser beseitigt werden können. Man dürfte deshalb, wenn man nicht etwa eine der angegebenen Glaswechselmaschinen anwenden will, die Untersuchung am besten in einem Abstande von 50 cm vornehmen. Eine höhere Genauigkeit der Untersuchungsresultate, als bei diesem Abstande erhalten werden kann, ist laut dem früher Gesagten kaum anders als wie eine scheinbare Exaktheit zu deuten. Auf der anderen Seite ist es nicht empfehlenswert, diesen Abstand zu verkürzen, und ist insbesondere von derjenigen Modifikation abzuraten, bei welcher unter Anwendung einer gewissen Korrektion der Einstellungspunkt des beobachteten Auges unter stetiger Verkürzung des Abstandes ermittelt wird, ein Vorgang, welcher nur als Vorversuch berechtigt zu sein scheint.

Zu dem speziellen Zwecke der Untersuchung der optischen Einstellung des Auges für exzentrisch einfallende Strahlenbündel verdienen die skiaskopischen Methoden vor allen anderen den Vorzug. Wegen des Astigmatismus und der Asymmetrie der Strahlenbündel ist nämlich die Refraktionsbestimmung im aufrechten Bilde an exzentrischen Teilen des Augenhintergrundes zweifellos weniger sicher, und von subjektiven Methoden kann wegen der geringen exzentrischen Sehschärfe kaum die Rede sein.

2. Ophthalmometrie.

Von der Bestimmung der Brechungsindizes abgesehen, welche schon in diesem Handbuche erörtert worden ist[1]), bezweckt die Ophthalmometrie wesentlich die Messung der Krümmungsradien der brechenden Flächen und die Bestimmung des Ortes derselben. Wenn es sich um ein zentriertes System von sphärischen Flächen handelte, so wäre nur noch die Messung des Durchmessers der Pupille hinzuzufügen. Bei der tatsächlichen Beschaffenheit des brechenden Systems muß aber eine genaue Erforschung der Form der brechenden Flächen und die exakte Bestimmung der Orientierung derselben in bezug auf eine willkürlich gewählte Achse als das Ziel der Ophthalmometrie gelten, obwohl dasselbe bisher nur betreffs der vorderen Hornhautfläche erreicht wurde, im übrigen aber immer noch weit entfernt erscheint.

Die wichtigsten ophthalmometrischen Methoden bestehen in der Messung der Größe eines Spiegelbildes und in der Bestimmung des Einfallswinkels eines Strahles, welcher im Schnittpunkte einer Fläche mit der Achse reflektiert wird. Durch ersteres Mittel erhält man die Brechkraft eines katadioptrischen Systems, letzteres ergibt unter trigonometrischer Rechnung den Ort der betreffenden Fläche. Daneben sind aber auch Methoden angewendet worden, bei welchen der Ort des Spiegelbildes ausschlaggebend ist, oder bei welchen auch das Krümmungszentrum einer Fläche durch trigonometrische Rechnung bestimmt wird. Endlich gehört in das Gebiet der Ophthalmometrie auch die Ermittlung der Konstanten des optischen Systems, welches die Linsensubstanz als heterogenes Medium darstellt.

1) Bd. 1, Abt. 2, S. 224.

Das vorzüglichste Mittel zur Messung der Größe eines Spiegelbildes ist immer noch das Ophthalmometer von Helmholtz, dessen Prinzip wesentlich dasselbe ist wie in dem unter dem Namen Heliometer bekannten astronomischen Instrumente und welches die Messung eines beweglichen Gegenstandes unter Verlegung der Ablesung bzw. der Kollimation zum Gegenstande selbst bezweckt. Hierzu braucht es im allgemeinen einen optischen Verdopplungsmechanismus und einen Kollimationsmechanismus, indem durch ersteren zwei optische Bilder des zu messenden Gegenstandes erzeugt werden, während durch letzteren der gegenseitige Abstand dieser Doppelbilder verändert wird, bis die Kollimation dadurch erhalten wird, daß das eine Ende des einen Bildes mit dem anderen Ende des anderen Bildes zusammenfällt. Im Helmholtzschen Instrumente sind beide Mechanismen in einem vereinigt, indem vor das Objektiv eines Fernrohres zwei planparallele Glasplatten derart um eine gemeinsame Achse beweglich angeordnet sind, daß sie je eine Hälfte der Objektivöffnung verdecken und von der Nullstellung aus, in welcher sie senkrecht auf der Fernrohrachse stehen, durch einen Zahnradmechanismus gleichzeitig um annähernd gleiche Beträge in entgegengesetztem Sinne gedreht werden, wonach an je einem Gradbogen der betreffende Drehungswinkel abgelesen wird. Das von einem Objektpunkte kommende Licht, welches bei horizontaler Trennungslinie der Platten durch die obere Hälfte der Objektivöffnung geht, erfährt somit beim Durchgang durch die schief gestellte obere Glasplatte eine Brechung in den beiden ebenen Flächen derselben, wobei der austretende Strahl stets dem einfallenden parallel ist, und keine merkliche chromatische Zerlegung des Lichtes erfolgt, sondern das Objekt nur — von einem bei größerem Objektabstande ganz unschädlichen geringen Astigmatismus abgesehen — scheinbar in seitlicher Richtung verschoben wird. Da nun durch die untere Platte eine ebensolche Scheinverschiebung nach der entgegengesetzten Seite bewirkt wird, und da beide Platten durch das optische System des Fernrohres in der Nähe der Austrittspupille desselben und der Eintrittspupille des beobachtenden Auges abgebildet werden, so sieht der Beobachter bei richtiger Haltung seines Auges zwei Bilder des Gegenstandes, deren gegenseitiger Abstand durch Drehung der Platten verändert wird, und welche bei der Nullstellung derselben zusammenfallen. Bei erreichter Kollimation ist die Größe des Gegenstandes gleich der Summe der durch die beiden Platten bewirkten Scheinverschiebungen. Um Fehler der Platten und der Skalen auf einfachste Weise zu korrigieren, wird die Kollimation wieder ermittelt, indem den Platten zunächst die in bezug auf die Nullstellung symmetrische Stellung gegeben wird, und außerdem von beiden Stellungen aus eine Drehung um 180^0 vorgenommen wird. Der Mittelwert der acht Skalenablesungen bei diesen vier Kollimationsstellungen ergibt den Wert des Winkels α, welcher in die Helmholtzschen Formeln

$$\sin\alpha = n\sin\beta \qquad\qquad E = 2h\,\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos\beta}$$

einzusetzen ist, wo E die gemessene Objektgröße, h die Dicke und n den Brechungsindex des Glases der Platten bezeichnen. Besondere Verfahren ermöglichen es, die Werte von h und n am fertigen Instrumente empirisch

zu bestimmen. Für den praktischen Gebrauch des Instrumentes zu wiederholten Bestimmungen gibt Helmholtz den Rat, sich eine Tafel von E für die ganzen Grade von 0^0 bis 60^0 zu berechnen. Man hat aber auch sehr großen Nutzen von einer Tafel, welche von 5^0 zu 5^0 fortschreitet, wenn man sachgemäß interpoliert.

Der große Vorteil dieses Instrumentes ist die Exaktheit der in sachverständiger Hand erreichbaren Messungsresultate, wodurch dasselbe immer noch seine Rangstellung unter den Ophthalmometern behauptet. Als Nachteile desselben haben sich besonders die erforderlichen wiederholten Einstellungen und Ablesungen sowie die Rechnungen bzw. die Interpolationen bei der Anwendung einer Tabelle und die Schwierigkeiten bei der Untersuchung anderer Normalschnitte als des horizontalen geltend gemacht. Hierzu kommt noch, daß durch die optischen Bilder der beiden Platten die Pupille des beobachtenden Auges nach Art eines Scheinersehen Versuches in zwei Teile zerlegt wird, und daß demzufolge bei nicht hinreichend genauer Einstellung die beiden Doppelbilder einer zur Trennungslinie der Platten parallelen Linie nicht zusammenfallen. Bei der Messung des Krümmungsradius der Hornhaut im Horizontalschnitte entsteht hierdurch eine Denivellation, indem beide Spiegelbilder nicht in einer und derselben Höhe zu liegen scheinen. Da nun die Abwesenheit der Denivellation das Kriterium dafür abgibt, daß man in einem Hauptschnitte die Messung vornimmt und die Hauptschnitte eben durch dieses Mittel aufgesucht werden, so liegt hierin eine Fehlerquelle, welche allen Ophthalmometern gemeinsam ist, in welchen bei geteilter Austrittspupille die Trennungslinie mit der Verdopplungsrichtung zusammenfällt. Dagegen wird das Messungsresultat nicht durch die Einstellungsfehler beeinflußt, wie es der Fall ist, wenn die Trennungslinie der beiden Hälften der Austrittspupille senkrecht auf der Verdopplungsebene steht.

Die erste eingreifende Änderung erfuhr das Ophthalmometer durch Coccius[1]), welcher eine unveränderliche Verdopplung, teils mit Platten, teils auch mit einem doppeltbrechenden Kalkspatprisma benutzte und die Kollimation bei der Messung eines Spiegelbildes durch die Variation der Objektgröße erzielte. Hierdurch wurde in der Tat der Weg für die Einführung der Ophthalmometrie in die ophthalmologische Praxis gebahnt, auf welchem die Arbeiten von Javal und Schjötz[2]) zum Ziele führten.

Die Ophthalmometrie der vorderen Hornhautfläche ist dank der modernen Instrumente in höchstem Grade erleichtert und ergibt dabei, soweit es sich um die Bestimmung des Astigmatismus derselben handelt, Resultate, an deren Exaktheit nichts auszusetzen ist, während das erhaltene Maß des Krümmungsradius nicht denselben Grad von Zuverlässigkeit hat wie beim Ophthalmometer von Helmholtz. Die wesentlichen Prinzipe der modernen Ophthalmometerkonstruktionen bestehen darin, daß das Objekt

1) A. Coccius. Über den Mechanismus der Akkommodation des menschlichen Auges. Leipzig 1867. Ophthalmometrie und Spannungsmessung am kranken Auge. Leipzig 1872.

2) Javal und Schjötz. Un ophthalmomètre pratique. Transactions of the international medical Congress. VIII. Session. London 1881. III. S. 30. — Annales d'oculistique. LXXXVI. 1881. S. 5.

am Instrumente selbst befestigt und der Abstand desselben vom untersuchten Auge möglichst verkürzt ist. In den nach dem Javalschen Typus gebauten Instrumenten wird die Verdopplung ohne Teilung der Austrittspupille durch ein Wollastonsches Quarzprisma erhalten, während die Kollimation durch Variation der Objektgröße erzielt wird. Als Objekt dient der Abstand zwischen zwei weißen Platten, welche durch diffuses Tageslicht oder durch artefizielles Licht beleuchtet werden, und welche verschiebbar an einem Bogen angeordnet sind, dessen Krümmungszentrum im beobachteten Auge liegt. Das Fernrohr, dessen Achse durch den Nullpunkt des Bogens und durch das Krümmungszentrum desselben geht, enthält im Okulare ein Fadenkreuz oder besser einen einzelnen Faden, dessen Ort mit dem Krümmungszentrum des Bogens konjugiert ist. Bei der scharfen Einstellung der Hornhautspiegelbilder auf diesen Faden ist somit der Abstand des Instrumentes vom Spiegelbilde möglichst konstant. Die weißen Platten enthalten je eine schwarze Linie, welche in der die Fernrohrachse enthaltenden Ebene liegt. Werden nach erfolgter Einstellung die Platten einander genähert, bis die Ränder der betreffenden Spiegelbilder aneinander stoßen, so scheinen die beiden schwarzen Linien an den Spiegelbildern in einer geraden Linie zu liegen, wenn keine Denivellation vorhanden ist, und die Verdopplungsebene des Instrumentes fällt dann mit einem Hauptschnitt der Hornhaut zusammen. Ist das nicht der Fall, so entsteht das Spiegelbild durch optische Projektion und erfährt dabei die durch die Formel 10 S. 16 angegebene Drehung, so daß das Spiegelbild nicht in derselben Ebene wie das Objekt, somit auch nicht in der Verdopplungsebene des Instrumentes liegt, woraus wiederum die Denivellation der Doppelbilder folgt. Das ganze Instrument wird dann um die Fernrohrachse gedreht, bis die Denivellation verschwindet, wonach die Stellung der Platten genau so geregelt wird, daß die betreffenden Spiegelbilder eben einander berühren, ohne ineinander überzugreifen. Nach erfolgter Ablesung an der Skala des Bogens wird dann das Instrument um einen Winkel von 90^0 um die Fernrohrachse gedreht, wonach auf dieselbe Weise eine neue Kollimation und Ablesung folgt. Gewöhnlich wird eine der Platten mit Stufen versehen, so daß, wenn die Kollimation für den am schwächsten brechenden Hauptschnitt bewerkstelligt worden ist, in dem anderen Hauptschnitte die Ablesung direkt am Spiegelbilde stattfindet, indem eine Stufe einem Hornhautastigmatismus von einer Dioptrie entspricht. Man kann dann die Untersuchung vollenden, ohne das Auge vom Okular zu entfernen. Das bei der Ablesung an der Skala erhaltene Maß ist ein Dioptrienwert D, welcher durch die Gleichung

$$D = 1000 \frac{n-1}{\varrho}$$

bestimmt wird, in welcher ϱ den in Millimetern gemessenen Krümmungsradius darstellt, und $n = 1{,}3375$ ist, welche Zahl aus technischen Gründen gewählt wurde, damit 45 dptr einem Radius von 7,5 mm entsprechen sollte. Bei der Fabrikation werden die Instrumente für diesen Wert empirisch kontrolliert, so daß bei richtiger Ausführung dieser Kontrolle der erhaltene Dioptrienwert, wenn derselbe in der Nähe der Zahl 45 liegt, annähernd zuverlässig ist, während sonst die Exaktheit der Messungsresultate zu wünschen

übrig lassen kann, weil aus praktischen Gründen die Skala gleichmäßig gemacht wird, obwohl dies dem tatsächlichen Verhalten nicht entspricht. Die Verdopplung wird gewöhnlich so gewählt, daß die in Winkelgrade geteilte Skala den Dioptrienwert angibt, und beträgt dann beinahe 3 mm. Hierbei kann man aber das mit den Stufen beabsichtigte Ziel einer bequemen Ablesung am besten dadurch erreichen, daß die eine Platte immer bei der Einstellung in dem zuerst untersuchten Hauptschnitte verschoben wird, wonach bei der Untersuchung des zweiten Hauptschnittes die Kollimation durch Verschieben der anderen Platte erfolgt. Letztere Platte ist dann immer beim Beginn der Untersuchung auf den Nullpunkt der Skala zu bringen, welcher der symmetrischen Stellung der Platten bei richtiger Kollimation und beim Mittelwerte der Hornhautkrümmung entspricht. Nach beendigter Untersuchung liest man dann an der Stellung der ersten Platte die Krümmung im zuerst untersuchten Hauptschnitte ab, an der Stellung der zweiten den Grad und das Vorzeichen des Hornhautastigmatismus. Da bei dieser Anordnung die Stufen an den weißen Platten überflüssig gemacht werden, so können dieselben ausschließlich mit Hinsicht auf die schärfste Kollimation konstruiert werden.

Da somit gewisse Beobachtungsfehler durch die Konstruktion des Instrumentes bedingt werden, deren Elimination auf große Schwierigkeiten stößt, so dürfte es, ohne daß ein Eingehen auf die möglichen Einstellungs- und Kollimationsfehler hier nötig wäre, ersichtlich sein, daß die modernen Ophthalmometern, die ja auch zum Zwecke der klinischen Hornhautophthalmometrie konstruiert worden sind, soweit es sich um exakte physiologische Untersuchungen handelt, kaum anders als zur Messung des Hornhautastigmatismus angewendet werden sollen. Das in theoretischer Hinsicht vollendetste Instrument zu diesem Zwecke ist aber das neue Sutcliffe-Ophthalmometer[1]), in welchem der Untersucher drei Bilder sieht, und zwei aufeinander senkrechte Normalschnitte gleichzeitig gemessen werden. Die Austrittspupille des Instrumentes ist in fünf Teile geteilt, wobei, wenn der vertikale und der horizontale Normalschnitt untersucht wird, der mittlere Teil ein Bild liefert, während ein zweites durch den oberen und unteren Teil, das dritte auf dieselbe Weise durch den rechten und linken Teil entsteht. Die bei geteilter Austrittspupille die unscharfe optische Einstellung charakterisierenden Scheinverschiebungen bewirken eine Verdopplung der beiden letzterwähnten Bilder, wodurch auf sinnreichste Weise ein Fadenkreuz ersetzt wird, während gleichzeitig die Nachteile der Teilung der Austrittspupille in Wegfall kommen. Die Kollimation wird durch sukzessive Änderung der Verdopplungsgröße in den beiden untersuchten Normalschnitten erreicht.

Der große Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, daß sich die Einstellungsfehler bei den beiden Messungen nicht summieren können, wie es bei der gewöhnlichen klinischen Ophthalmometrie der Fall ist. Außerdem gewährt die Ersetzung des Fadenkreuzes durch den oben erwähnten auf dem Scheinerschen Versuche basierten Mechanismus einen höchst wert-

1) J. H. Sutcliffe, One-position ophthalmometry. The optician and photographic trades review. XXXIII. 1907. Supplement S. 8.

vollen Schutz gegen Einstellungsfehler, wozu noch kommt, daß die Form des Objektes die Kollimation sehr erleichtert. Den großen Vorteil der Ermittlung des Astigmatismus durch eine einzige Messung kann man aber auch mit dem gewöhnlichen Ophthalmometer erreichen, indem derselbe, wie ich gezeigt habe [1]), aus der Denivellation in einer einen Winkel von 45° mit den Hauptschnitten bildenden Ebene bestimmt werden kann. Zu diesem Zwecke braucht man nur die eine der weißen Platten am Ophthalmometer in einer zur Verdopplungsebene senkrechten Richtung verschiebbar zu machen und eine entsprechende Skala anzubringen. Das einer Dioptrie entsprechende Intervall dieser Skala muß halb so groß sein wie das Intervall einer für die Messung der Radien bestimmten, in der Ebene der Kollimationsfigur belegenen Skala. Man sucht nach dieser Methode zunächst einen Normalschnitt der Hornhaut auf, in welchem die Denivellation verschwindet, während die senkrecht verschiebbare Kollimationsfigur in der Verdopplungsebene liegt, dreht dann das Instrument um einen Winkel von 45° um die Fernrohrachse und bringt endlich die dabei entstehende Denivellation durch senkrechte Verschiebung der betreffenden Platte zum Verschwinden.

Besonders bei der genauen Ermittlung der Form der Hornhaut läßt die Exaktheit der modernen Ophthalmometerkonstruktionen viel zu wünschen übrig. Zwar können wohl die qualitativen Verhältnisse, welche aus einem Vergleiche der Abflachung in verschiedenen Richtungen hervorgehen, mit denselben kenntlich gemacht werden, wobei der Vorteil der leichten Untersuchung einer großen Zahl von Fällen offensichtlich ist, aber in quantitativer Hinsicht sind die Messungsresultate nicht hinreichend zuverlässig um einer exakten mathematischen Bearbeitung zugrunde gelegt werden zu können. Was eine Messung mit dem Ophthalmometer tatsächlich ergibt, ist nämlich der Winkel zwischen den in zwei Punkten der Hornhautoberfläche errichteten Normalen, wenn der gegenseitige Abstand dieser Punkte durch die Verdopplungsgröße bestimmt ist. Die mathematische Verwertung der durch Messungen der Krümmung in verschiedenen Punkten eines und desselben Normalschnittes gefundenen Form der Hornhaut zur Untersuchung der Strahlenbrechung in derselben setzt voraus, daß bei jeder folgenden Messung der eine Endpunkt des Objektes in demselben Hornhautpunkte gespiegelt wird wie bei der vorhergehenden Messung der andere Endpunkt. In den modernen Ophthalmometern hat aber die Verdopplung allgemein eine solche Größe, daß der tatsächlich gemessene Winkel bei normaler Hornhautkrümmung den Wert von 20° übersteigt, so daß nur einige wenige Messungen in einem und demselben Normalschnitte anwendbar wären, wobei aber wiederum zu wenig Tatsächliches der Berechnung zugrunde gelegt werden kann. In welchem Grade durch Verkleinerung der Verdopplung eine Abhilfe geschafft werden könnte, läßt sich nicht vorhersagen, da dabei auch die Kollimationsfehler entsprechend vergrößert werden. Daß es aber nicht angeht, mit der gewöhnlichen Verdopplungsgröße die Messung bei von 5° zu 5° veränderter Blickrichtung zu wiederholen und diese Messungen unter der Annahme, daß der entsprechende Krümmungsradius gefunden wäre, der Be-

1) En praktisk metod att bestämma hornhinnans astigmatism genom den s. k. denivelleringen af de oftalmometriska bilderna. Nord. Ophth. Tidskrift. 1889.

rechnung der Hornhautform zugrunde zu legen, leuchtet ohne weiteres ein, da das Spiegelbild der einen weißen Platte bei den vier folgenden Messungen innerhalb der zuerst gemessenen Hornhautpartie liegt.

Von Senff und Helmholtz wurde die Hornhautform approximativ unter Anwendung von drei in verschiedenen Blickrichtungen gemessenen Radien als eine elliptische berechnet, und hiervon gilt, daß eine genauere Berechnung mit den damals zur Verfügung stehenden Mitteln kaum exakt ausführbar gewesen wäre. Wie weiter unten gezeigt werden soll, behält diese approximative Form zu gewissen wissenschaftlichen Zwecken noch ihre volle Berechtigung bei. Exakter bestimmt wurde die Form eines Normalschnittes der Hornhaut zuerst von Aubert[1]) unter Anwendung schärfer begrenzter Lichtquellen und dann von Blix[2]) mit einer eigenartigen, weiter unten zu berücksichtigenden ophthalmometrischen Methode. Mit den jetzt zur Verfügung stehenden Lichtquellen läßt sich das Ophthalmometer von Helmholtz vorzüglich dazu anwenden, obwohl die Untersuchung anderer Normalschnitte als des horizontalen weniger bequem ist. Wird die Nernstspaltlampe mit einem regulierbaren Bilateralspalt versehen, so stellt dieselbe die ideale Lichtquelle zur exakten Ophthalmometrie dar, und ich habe sie auch ursprünglich zu diesem Zwecke konstruiert („ophthalmometrische Nernstlampe"). Man läßt unter Anwendung zweier solcher Lampen zur Messung im Horizontalschnitte am besten das obere Ende des einen Spaltes in derselben Horizontalebene liegen wie das untere Ende des anderen, wobei die exakte Kollimation sehr leicht zu bewerkstelligen ist, indem nur eine Lichtlinie gesehen wird. Die Fähigkeit des Auges, zu beobachten, ob eine solche Linie gebrochen ist oder nicht, ist bekanntlich eine sehr große.

Auf analoge Weise wie bei der Messung des Hornhautastigmatismus kann der Einfluß der Einstellungsfehler auf die Beurteilung der Form eines Normalschnittes dadurch eliminiert werden, daß die miteinander zu vergleichenden Radien bei einer und derselben Einstellung gemessen werden, wie es durch die Photographie des Hornhautspiegelbildes erreicht werden kann. Zwar eignet sich diese Methode wegen der zeitraubenden Messungen und Rechnungen nicht zu kurrenten Untersuchungen, aber auf der anderen Seite gibt die photographische Ophthalmometrie eine Genauigkeit der Resultate, welche bisher auf keine andere Weise erreicht wurde. Ich[3]) verwandte dazu ein Objekt, welches in einem und demselben Hauptschnitte gleichzeitig den Radius in sieben Punkten gab. Auf einer schwarzen Scheibe waren, wie es die Fig. 15 zeigt, vier doppelte konzentrische hellweiße Kreise gezeichnet, so daß jeder Meridian von acht scharf markierten Linien geschnitten wurde. Auf dem photographischen Negativ sind diese Linien hell auf dem dunklen Grunde, was die genaue Einstellung des Fadenkreuzes in die Mitte derselben bei der Messung mit Teilmaschine sehr erleichtert.

1) H. Aubert, Nähert sich die Hornhautkrümmung am meisten der einer Ellipse? Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie. XXXV. 1885. — Die Genauigkeit der Ophthalmometermessungen. Ebenda XLIX. 1891.

2) M. Blix, Oftalmometriska studier. Upsala Läkareförenings Förhandlingar. XV. 1880. S. 349.

3) Photographisch-ophthalmometrische und klinische Untersuchungen über die Hornhautrefraktion. Kungl. Sv. Vet. Akad. Handl. 1896. Bd. 28.

Die entsprechenden Abstände auf der Scheibe sind so berechnet, daß ihre Spiegelbilder in einer sphärischen Fläche eine und dieselbe Größe haben

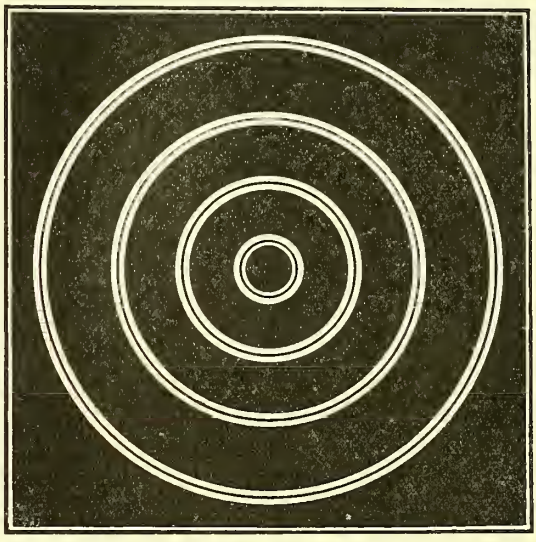


Fig. 15.

(bei einem Radius von 7,8 mm annähernd 2/3 mm) und sich sonst zueinander wie die Radien der betreffenden Flächenelemente verhalten. Es wurde auf dieselbe Weise wie bei der photographischen Keratoskopie in fünf Blick-

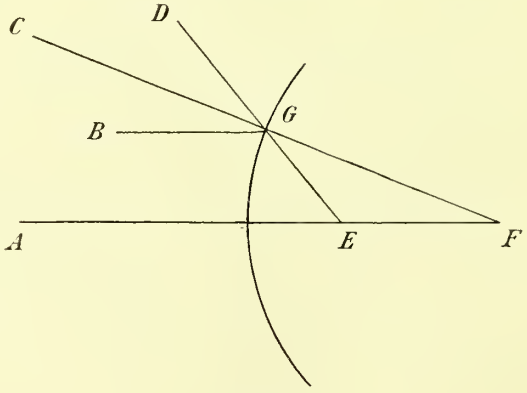


Fig. 16.

richtungen photographiert, nämlich beim Blick geradeaus ins Objektiv und bei solcher Drehung des Blickes in den vier Hauptrichtungen, daß das peripherste bei der zentralen Blickrichtung gemessene Flächenelement genau mit dem zentralsten bei der peripheren Blickrichtung gemessenen zusammenfiel.

Die Berechnung der Hornhautform aus den Ophthalmometermessungen geschieht auf folgende Weise. Es sei in der Fig. 16 AEF die zur Visierlinie parallele Hornhautnormale, die ophthalmometrische Achse der Hornhaut, DGE der von einem Objektpunkte kommende Strahl, welcher nach der Spiegelung in der Hornhaut in der Richtung GB zum Ophthalmometer geht, und CGF die Normale der Hornhaut im spiegelnden Punkte, welche mit der ophthalmometrischen Achse den Winkel $CFA = \varphi$ bildet. Beim Gebrauche des Ophthalmometers von Helmholtz oder eines Instrumentes mit ähnlicher Verdopplungsvorrichtung ist die Linie BG parallel zur Linie AF. Folglich ist der Einfallswinkel gleich φ und der Winkel DEA gleich 2φ. Bei anderen Instrumenten macht die Linie BG einen kleinen Winkel mit der ophthalmometrischen Achse, welcher jedoch bei dem Verhältnis des Abstandes des Ophthalmometers zum Hornhautradius

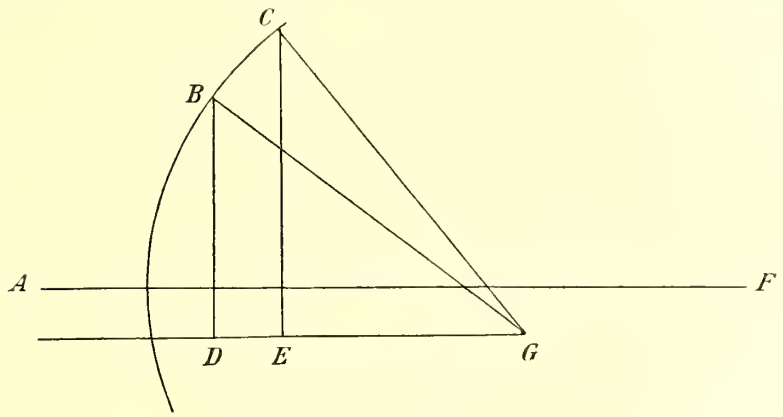


Fig. 17.

und bei den sonst der Genauigkeit der Messungen gesetzten Grenzen vernachlässigt werden darf. Dasselbe gilt von dem Abstande des Punktes E von der Hornhaut. Man erhält also entweder direkt am Gradbogen den Winkel 2φ durch den Winkelabstand des Objektpunktes von der Ophthalmometerachse, oder man erhält die Tangente desselben, indem man den Abstand des Objektpunktes von der Ophthalmometerachse durch den Abstand der achsensenkrechten Ebene, in welcher er enthalten ist, von der Hornhaut dividiert. Auf diese Weise ist der einem beliebigen Objektpunkte entsprechende Winkel φ immer mit hinreichender Genauigkeit bekannt und umgekehrt. Es sei nun wiederum in der Fig. 17 AF die ophthalmometrische Achse, und es mag das Licht von zwei verschiedenen Objektpunkten in den beiden Hornhautpunkten B C gespiegelt werden. Die in diesen Punkten gezogenen Normalen schneiden einander im Punkte G, welcher um so genauer mit dem Krümmungsmittelpunkte des Elementes BC zusammenfällt, je kleiner dieses ist, so daß der Grenzwert des Abstandes $BG = CG$ den Krümmungsradius ϱ darstellt. Durch G wird eine Linie parallel zur ophthalmometrischen Achse gezogen, wonach auf diese die Lotlinien von den Punkten B C gefällt werden. Werden nun die Abstände der Punkte B C von der Achse

mit y_1 y_2, die Abstände der Linien BD, CE von dem Schnittpunkte der Hornhaut mit der ophthalmometrischen Achse, dem ophthalmometrischen Achsenpunkte derselben, mit x_1 x_2 und die Winkel BGD, CGE mit φ_1 φ_2 bezeichnet, so hat man zunächst

$$BD = \varrho \sin \varphi_1 \qquad CE = \varrho \sin \varphi_2$$

und da $CE - BD = y_2 - y_1$ ist, so ergibt sich die allgemeine Formel zur Berechnung des Krümmungsradius

$$\varrho = \frac{y_2 - y_1}{\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1}$$

in welcher $y_2 - y_1$ durch den Betrag der Verdoppelung gegeben ist bzw. auf der photographischen Platte gemessen wird, während φ_1 φ_2 durch die Lage der Objektpunkte bekannt sind. In dem speziellen Falle, wo dieselben symmetrisch zur Ophthalmometerachse liegen, und somit $\varphi_2 = -\varphi_1$ ist, kann die Formel in der ihr von Helmholtz gegebenen Gestalt

$$\varrho = \frac{\beta}{2 \sin \left(\frac{1}{2} \operatorname{arc\,tg} \frac{b}{2a} \right)}$$

geschrieben werden, wo β den Betrag der Verdoppelung, b den Abstand der im Spiegelbilde kollimierten Punkte voneinander und a den Abstand der dieselben verbindenden Linie von der Hornhaut bedeutet, und welche, je kleiner die Winkel sind, um so genauer mit der approximativen Formel

$$\varrho = \frac{2a\beta}{b} \text{ bzw. } D = kb$$

zusammenfällt, welche in der letzteren Gestalt, wo k die Ophthalmometerkonstante darstellt, der modernen Ophthalmometrie mit konstanter Verdopplungsgröße zugrunde gelegt wird.

Wie schon hervorgehoben wurde, hat man bei der Ausführung der Messungen in anderen Blickrichtungen dieselben so zu wählen, daß jedesmal ein in der vorhergehenden Messung zur Spiegelung angewendeter Hornhautpunkt auch in der folgenden zur Verwendung kommt. In dieser sekundären Blickstellung ergibt die Messung dann eine Anzahl Radien und die entsprechenden Winkel φ in bezug auf die sekundäre Achse. Dieselben werden zunächst durch Addition mit dem Betrage der Drehung der Blicklinie in die in bezug auf die ophthalmometrische Achse der Hornhaut gültigen Winkel φ umgerechnet, wonach die y-Werte in bezug auf diese Achse durch die allgemeine Formel erhalten werden. Die x-Werte erhält man unter Beachtung der aus der Fig. 17 hervorgehenden Beziehungen

$$GD = \varrho \cos \varphi_1 \qquad GE = \varrho \cos \varphi_2 \qquad GD - GE = x_2 - x_1$$

durch die Formel

$$x_2 - x_1 = \varrho (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2)$$

und als Resultat der Berechnung hat man somit die Koordinaten der zur Spiegelung verwendeten Hornhautpunkte, die Neigung der Normalen in diesen Punkten und die Krümmungsradien der zwischen denselben belegenen Elemente des gemessenen Normalschnittes, Daten, welche hinreichend — aber auch notwendig — sind, um durch trigonometrische Rechnung die vollständige Einwirkung der Hornhaut auf die Strahlenbrechung zu untersuchen.

Zur Konstruktion der zur photographischen Ophthalmometrie angewendeten Scheibe mit vier konzentrischen Kreisen, denen von innen nach außen gerechnet die Werte φ_1 bis φ_4 entsprechen mögen, hat man zunächst die einem bestimmten Hornhautradius entsprechende Größe des Hornhautspiegelbildes willkürlich zu wählen und teils $2y_1$ teils die verschiedenen Werte $y_{n+1} - y_n$ gleich derselben zu machen, wonach $\sin \varphi_1 = \frac{y_1}{\varrho}$ zu setzen ist, und die übrigen Werte φ sich aus der allgemeinen Formel ergeben. Die oben formulierte Bedingung der Drehungsgröße der Blicklinie zur Photographie der Spiegelbilder in den exzentrischen Teilen der Hornhaut wird erfüllt, wenn die Fixationsmarken so angebracht werden, daß der Drehungswinkel gleich $\varphi_3 + \varphi_4$ ist. Zur ophthalmometrischen Untersuchung des Horizontalschnittes der Hornhaut mit dem Instrumente von Helmholtz stellt man am besten die beiden Lichtquellen symmetrisch auf und berechnet ein für allemal den entsprechenden Winkel φ, wonach die Blicklinie bei jeder folgenden Messung um den Betrag von 2φ gedreht wird. Ersichtlicherweise kann auch das Ophthalmometer von Javal auf verschiedene Weise zu solchen Messungen eingerichtet werden, wenn nur die Hauptbedingungen erfüllt werden, daß die Werte von y und φ in exakter Weise ermittelt und unter Anwendung exakter Formeln bearbeitet werden, was bisher nicht der Fall war. Auf jeden Fall wird aber letzteres Instrument die am wenigsten genauen Resultate ergeben, wie aus obenstehender Würdigung desselben hervorgeht.

Zur Berechnung des Astigmatismus aus der Denivellation in einer den Winkel von 45° mit den Hauptschnitten bildenden Ebene wurde oben die Regel angegeben, nach welcher die Skala zu graduieren ist. Diese Regel ergibt sich auf folgende Weise. Wird nach Ermittlung eines Hauptschnittes der Hornhaut der Bogen des Ophthalmometers um diesen Winkel gedreht und dann die Kollimation hergestellt und die Denivellation durch Verschieben der einen weißen Figur in der zur Verdopplungsebene senkrechten Richtung ausgeglichen, so sind die kollimierten Punkte die Endpunkte einer Linie, deren im Fokus des Ophthalmometers gelegene optische Projektion in der Verdopplungsebene liegt. Der Abstand dieses Fokus von den beiden nicht exakt in einer und derselben Ebene gelegenen Fokalpunkten des gespiegelten Strahlenbündels kann bei der erzielbaren Genauigkeit vernachlässigt werden, und es sind dann die beiden den Hauptschnitten entsprechenden Projektionskoeffizienten, wie aus der Formel (8) S. 15 hervorgeht, gleich den betreffenden Vergrößerungskoeffizienten, welche sich wiederum umgekehrt wie die katoptrische Brechkraft in den beiden Hauptschnitten verhalten, indem

$$K_1 D_1 = K_2 D_2 = L$$

ist, wo KD Vergrößerungskoeffizienten und Brechkräfte, L die im katoptrischen Brennpunkte der Hornhaut gemessene Konvergenz des einfallenden Strahlenbündels bedeutet. In der Formel (10) stellt ω den Winkel dar, den die zu projizierende Linie mit dem ersten Hauptschnitt bildet, während $\operatorname{tg}\omega' = 1$ ist, woraus $\operatorname{tg}\omega = \frac{D_2}{D_1}$ und somit

$$\operatorname{tg}(\omega - 45^0) = \frac{D_2 - D_1}{D_2 + D_1} = \frac{c}{b}$$

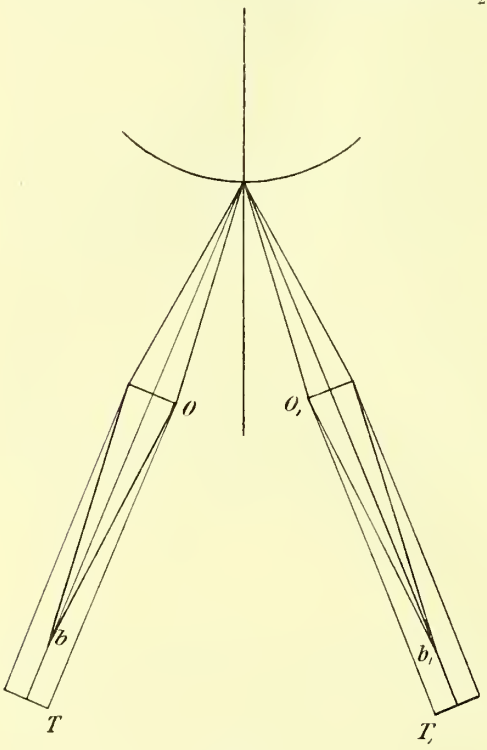


Fig. 18.

resultiert, wo c die zur Aufhebung der Denivellation erforderliche Verschiebung, b die durch die Kollimation bestimmte Länge der zu projizierenden Linie darstellt. Es mögen nunmehr D_1 D_2 die betreffende dioptrische Brechkraft darstellen, wobei die Formel unverändert bleibt. Zufolge dem Theoreme von Euler hat man dann unter Anwendung der Ophthalmometerkonstante

$$\frac{1}{2}(D_1 + D_2) = kb,$$

wodurch sich der mathematische Ausdruck der oben angegebenen Regel

$$D_2 - D_1 = 2kc$$

ergibt. Diese Formel ist somit approximativ in demselben Grade wie die allgemein in der modernen Ophthalmometrie angewendete. Die durch die Approximation bedingten Fehler sind aber bei der Messung des Astigmatismus ohne Belang und kommen erst bei der Berechnung des absoluten Betrages der Hornhautrefraktion in Betracht.

Die Dicke der Hornhaut ist im lebenden Auge nach zwei Methoden gemessen worden. Blix[1]) maß zuerst dieselbe mit seinem Ophthalmometer, welches aus zwei nach dem Schema der Fig. 18 angeordneten Mikroskopen TT, mit den Objektiven OO, besteht. Im letzteren ist das Okular durch ein hell erleuchtetes Diaphragma b, ersetzt, dessen Bild durch das Objektiv im Schnittpunkte der Achsen erzeugt wird. Da das andere Mikroskop, durch welches der Untersucher hinsieht, mittels des Fadenkreuzes b auf diesen Schnittpunkt eingestellt ist, so wird das Bild des Diaphragmas nur dann

1) a. a. O.

scharf gesehen, wenn der scheinbare Ort des Hauptpunktes einer spiegelnden Fläche im Schnittpunkte der Achsen liegt. Die Mikroskope können nun teils in unveränderter Stellung zueinander längs der Symmetrielinie des Instrumentes teils auch bei unverändertem Schnittpunkte der Achsen gleichzeitig um den gleichen Betrag längs denselben verschoben werden. Letzterer Mechanismus dient zum Messen eines Krümmungsradius, ersterer zum Messen des Abstandes zwischen zwei spiegelnden Flächen. Die Dicke der Hornhaut wird demnach dadurch gemessen, daß bei zwei sukzessiven Einstellungen unter Verschiebung des Instrumentes längs der Symmetrieachse das in der vorderen bzw. hinteren Hornhautfläche entstandene Spiegelbild scharf eingestellt wird. Die Verschiebung des Instrumentes ist dann gleich der scheinbaren Dicke, die wirkliche Dicke wird trigonometrisch berechnet.

Die trigonometrische Berechnungsmethode, welche in der Ophthalmometrie eine nicht unwesentliche Rolle spielt, sei hier kurz unter Anwendung der in der technischen Optik gebräuchlichen Bezeichnungen angegeben. Es sei in der Fig. 19 ASB eine Schnittlinie der brechenden Fläche, welche zunächst als sphärisch angesehen wird, C der Krümmungsmittelpunkt derselben, SCO die Achse, BO ein einfallender Strahl, welcher die Fläche im Punkte B schneidet, und BC die durch diesen Punkt gehende Flächennormale. Das Licht bewege sich von links nach rechts in der Figur, so daß O den Punkt darstellt, wo der einfallende Strahl die Achse schneiden würde, wenn derselbe ungebrochen durch die Fläche ASB ginge. Der Abstand OS, die Schnittweite wird mit s, der Krümmungsradius mit ϱ, der Winkel BOS, der Öffnungswinkel des Strahles BO mit u und der Einfallswinkel OBC mit i bezeichnet. Für den gebrochenen Strahl haben die Werte s′u′i′ die analoge Bedeutung. Schnittweiten und Krümmungsradien werden allgemein in der Richtung der Lichtbewegung positiv gerechnet. Um das Vorzeichen des Öffnungswinkels zu definieren, hat man zunächst auf der Fläche eine positive Richtung zu wählen, wodurch das Vorzeichen des Ortes des Schnittpunktes des Lichtstrahles mit der Fläche bestimmt wird. Der Öffnungswinkel hat dasselbe Vorzeichen wie das Produkt der Schnittweite mit diesem Orte. Wenn z. B. in der Fig. 18 die Richtung nach oben als die positive definiert wird, so hat der Öffnungswinkel des Strahles BO positives Vorzeichen. Das Vorzeichen des Einfallswinkels wird durch die ohne weiteres aus der Figur sich ergebende Gleichung

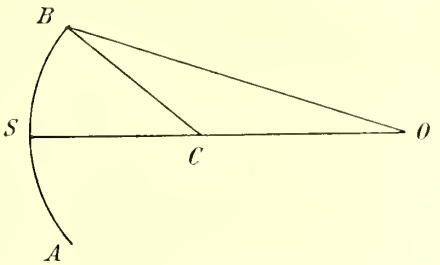


Fig. 19.

$$\frac{\sin i}{\sin u} = \frac{s - \varrho}{\varrho}$$

bestimmt[1]). Diese Gleichung stellt nebst der analogen, für den gebrochenen Strahl geltenden, und den beiden Gleichungen

1) In meiner Bearbeitung der Dioptrik von Helmholtz habe ich aus Bequemlichkeitsgründen das umgekehrte Vorzeichen des Einfallswinkels gewählt, weil ich es für unnötig hielt, dort auf die allgemeine Methode einzugehen.

$$n \sin i = n' \sin i' \qquad \varphi = u + i = u' + i'$$

wo nn' die Brechungsindizes und φ den Öffnungswinkel BCS der Normale bezeichnen, die nötigen Mittel zur trigonometrischen Verfolgung des Strahles dar. Einige Spezialfälle erfordern allerdings eine besondere Erläuterung. Im Falle $s = 0$, wo die oben angegebene Regel zur Bestimmung des Vorzeichens von u scheinbar versagt, braucht man nur die brechende Fläche um eine unendlich kleine Strecke in der einen oder anderen Richtung längs der Achse zu verschieben, um die Regel anwenden zu können. Im Falle $u = 0$ hat man an Stelle der unendlich großen Schnittweite die Einfallshöhe $h = \varrho \sin \varphi$ des Strahles zur Bestimmung desselben zu benutzen. Endlich gilt im Falle $\varrho = \infty$ die Beziehung $h = s \operatorname{tg} u = s' \operatorname{tg} u'$.

Für nichtsphärische Flächen werden Öffnungswinkel und Schnittweiten auf eine als Achse ausgewählte Flächennormale bezogen, und die Beziehung zwischen dem Öffnungswinkel des Strahles und dem Einfallswinkel nimmt allgemein die Form

$$\frac{\sin i}{\sin u} = \frac{s - M}{N}$$

an, wo N den Abstand des Schnittpunktes der Normale mit der Achse vom Einfallspunkte und M den Abstand desselben Punktes vom Schnittpunkte der Achse mit der Fläche darstellt. In Übereinstimmung hiermit wird die Einfallshöhe durch die Formel $h = N \sin \varphi$ angegeben. Voraussetzung ist, daß der Strahl in einem die Achse enthaltenden Normalschnitte verläuft. Allgemein erhält man aus der Schnittweite und dem Öffnungswinkel des einfallenden Strahles, wenn die Gleichung der Fläche bekannt ist, die Koordinaten des Einfallspunktes und aus diesen wiederum die Größen N und M, wonach die Rechnung die Schnittweite und den Öffnungswinkel des gebrochenen Strahles ergibt. Im Falle einer Umdrehungsfläche ist N gleich dem sagittalen Krümmungsradius der Fläche im Einfallspunkte, und im Falle einer Fläche zweiten Grades besteht eine einfache Beziehung zwischen dieser Größe, dem tangentialen Krümmungsradius und dem Scheitelradius.

Zur Berechnung der Dicke der Hornhaut erhält man nach der Methode von Blix die Werte s und u direkt durch den Betrag der Verschiebung des Instrumentes bzw. durch den Neigungswinkel der Mikroskopachsen zur Symmetrielinie, wonach unter Anwendung der eben angegebenen Formeln, in welchen für ϱ der tangentiale Hornhautradius einzusetzen ist, die wirkliche Hornhautdicke durch den Wert von s' erhalten wird. Bei der geringen Ausdehnung des angewendeten Flächenstückes kann die Hornhaut als sphärisch angesehen werden. Es ist aber einleuchtend, daß es auch genügt, den Öffnungswinkel des einfallenden Strahles und den Einfallswinkel zu kennen, um mit diesen Formeln den Wert von s' zu finden. Das ist die Methode, mit welcher Helmholtz den Ort der hinteren Linsenfläche bestimmte, und welche ich auf folgende Weise zur Messung der Hornhautdicke angewendet habe. Als Objekt für die Spiegelung in der hinteren Hornhautfläche wurden zwei ophthalmometrische Nernstlampen mit vertikal in einer und derselben Linie stehenden Spalten angewendet. Es zeigte sich, daß mit einem guten, 20mal vergrößernden Fernrohr bei geeigneter Lichtstärke die Spiegelbilder auch an der dünnsten Stelle außerordentlich gut sichtbar sind, sobald der Einfallswinkel ungefähr 25^0 beträgt. Die im Hornhautscheitel des zu unter-

suchenden Auges gemessene vertikale Winkeldistanz der beiden Spaltmittelpunkte war 12°, wobei das angewendete Hornhautelement hinreichend klein ist, um das fiktive Spiegelbild der vertikalen Linie, deren Endstrecken durch die Spalte bestimmt sind, als eine gerade Linie betrachten zu können. Oberhalb des Kopfes des zu untersuchenden war ein theodolithähnliches Instrument befestigt, dessen vertikale Achse unten in eine Spitze auslief. Ophthalmometrische Nernstlampen und Fernrohr wurden in einer Winkeldistanz von je 25° von der Nullstellung des Theodolithfernrohres angebracht, und es wurde zunächst die genaue Orientierung des Hornhautscheitels in der Verlängerung der vertikalen Theodolithachse mit dem um eine horizontale Achse drehbaren Beobachtungsfernrohr kontrolliert, indem dasselbe mittels Fadenkreuz auf das Hornhautspiegelbild und dann auf die Spitze eingestellt wurde, welche Kontrolle wiederholt wurde, nachdem Lampen und Fernrohr Platz gewechselt hatten. Einem kleinen, auf einem verschiebbaren Stativ befestigten Glühlämpchen mit geradem, vertikalem Faden wurde dann eine solche Stellung gegeben, daß das Hornhautspiegelbild desselben in derselben vertikalen Linie sichtbar war wie die in der hinteren Hornhautfläche entstandenen Spiegelbilder der ophthalmometrischen Nernstlampen. Der Winkelabstand des Glühlämpchens vom Fernrohre ist dann gleich dem doppelten Einfallswinkel des in der hinteren Hornhautfläche gespiegelten Lichtes, wenn der Strahlengang umgekehrt wird. Bei der Ausführung der Untersuchung wurde zunächst genau darauf geachtet, daß der Hornhautscheitel und der Mittelpunkt des Glühlämpchens in einer und derselben Horizontalebene lagen, und daß die Nernstspalte symmetrisch in bezug auf dieselbe Ebene standen. Durch Vorversuche wurde dann unter Anwendung eines in derselben Ebene beweglichen Fixationszeichens diejenige Blickrichtung ermittelt, bei welcher der Einfallswinkel, nachdem Lampen und Fernrohr Platz gewechselt hatten, approximativ unverändert blieb, eine Stellung, bei welcher die optische Achse des Auges wenig von der Nullstellung des Theodolithfernrohres abweicht, und bei welcher das in der hinteren Hornhautfläche entstehende Spiegelbild im Schnittpunkte derselben mit der zur Nullstellung des Theodolithfernrohres parallelen Normale der Vorderfläche gesehen wird. Da diese Normale beiden Flächen gemeinsam ist, so stellt dieselbe die Zentrierungsachse der beiden Hornhautflächen dar. Das Messungsergebnis ist der numerische Winkelabstand ω des Glühlämpchens von derselben, und man hat in die oben angegebenen Formeln $u = 25^0$ sowie $i = -\frac{u+\omega}{2}$ einzusetzen, um die Dicke s' der Hornhaut zu finden.

Zur **Messung der Krümmung der hinteren Hornhautfläche** habe ich gleichfalls eine von Helmholtz zur Messung der Linsenflächen benutzte Methode unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampen anwendbar gemacht. Dieselbe besteht darin, daß ein Spiegelbild, welches zu lichtschwach ist, um direkt mit dem Ophthalmometer gemessen werden zu können, mit einem in der Nähe desselben erzeugten Hornhautspiegelbilde verglichen wird, während die Größe des letzteren Spiegelbildes kontinuierlich verändert wird, bis beide Spiegelbilder gleich groß sind. Bei der eben beschriebenen Versuchsanordnung werden die Spalte horizontal gestellt und

die in der vorderen Hornhautfläche entstehenden Spiegelbilder von zwei Glühlämpchen mit geradem horizontalem Faden so eingestellt, daß je ein Spiegelbild die Verlängerung eines der in der hinteren Hornhautfläche entstandenen, von den ophthalmometrischen Nernstlampen herrührenden Spiegelbilder bildet. Das vom vertikalen Abstande der Faden der beiden Glühlämpchen repräsentierte Objekt gibt dann in der vorderen Hornhautfläche ein Spiegelbild, welches dem in der hinteren Hornhautfläche entstandenen, dem vertikalen Abstande der beiden Spalte entsprechenden gleich ist. Das Fixationszeichen wird wie bei der Messung der Dicke so gestellt, daß die Zentrierungsachse der Hornhaut mit der Nullstellung des Theodolithfernrohres zusammenfällt, und es werden Beobachtungsfernrohr und Nernstlampen in gleicher Winkeldistanz aufgestellt. Gemessen wird die Größe und Entfernung der beiden Objekte sowie ihre Winkeldistanz von der Zentrierungsachse, welche für Nernst- bzw. Glühlampen mit b a u bzw. $b_0 a_0 u_0$ bezeichnet werden mögen. Wird u bis zum Werte von 40° vermehrt, so ist die Beobachtung sehr leicht, aber durch einige Übung lernt man ohne besondere Schwierigkeit bei 25° zu beobachten. Die kleineren Winkel sind deshalb vorzuziehen, weil die Asymmetrienwerte, welche die Unähnlichkeit von Objekt und Bild bedingen, mit zunehmenden Einfallswinkeln wachsen, so daß die Berechtigung der Anwendung der Abbildungsgesetze erster Ordnung Einbuße leidet, obwohl die Formeln für jede beliebige Größe des Einfallswinkels exakt sind. Nach hinreichender Adaption in dem nur durch die zur Untersuchung angewendeten Lampen beleuchteten Zimmer sieht man die in der hinteren Hornhautfläche entstandenen Spiegelbilder augenblicklich, sobald man das Fernrohrobjektiv fixieren läßt, und man tut gut, jedesmal, wenn dieselben undeutlich werden, den Blick in diese Stellung zu bringen und dann langsam zum Fixationszeichen wandern zu lassen. Die Kontrolle der richtigen Stellung der Glühlämpchen wird am besten nach momentaner Abbrechung des Stromes im Zündungsaugenblick bewerkstelligt.

Die katoptrische Brechkraft der vorderen Hornhautfläche ist bei der sagittalen Abbildung des Nernstlampen- bzw Glühlämpchenobjektes, wenn ϱ_1 den sagittalen Krümmungsradius darstellt,

$$-\frac{2\cos u}{\varrho_1} \qquad \text{bzw.} \quad -\frac{2\cos\frac{1}{2}(u+u_0)}{\varrho_1}$$

und es mag die Größe des Spiegelbildes mit β bzw. β_0 bezeichnet werden. Laut der allgemeinen Abbildungsgleichung ist der Ausdruck $\frac{KD}{L}$ stets gleich der Einheit. Wird derselbe für beide Spiegelungen gebildet, indem die Objektabstände vom katoptrischen Brennpunkte gerechnet werden, so ergibt sich, wenn das Gleichheitszeichen zwischen beiden Ausdrücken gesetzt wird,

$$\frac{\beta_0}{\beta} = \frac{a b_0 \cos u}{a_0 b \cos\frac{1}{2}(u+u_0)}$$

in welcher Formel ersichtlicherweise die Objektabstände, wenn dieselben

sich wenig voneinander unterscheiden, aber auf der anderen Seite groß im Verhältnis zum Hornhautradius sind, ohne merkbaren Fehler vom Hornhautscheitel gerechnet werden können.

Die Brechkraft des katadioptrischen Systems, welches das in der hinteren Hornhautfläche entstehende Spiegelbild liefert, ergibt sich aus der Formel (4a) S. 13:

$$2D_1(1-\delta_1 D_1)+D_2(1-\delta_1 D_1)^2$$

wo D_1 die sagittale dioptrische Brechkraft der vorderen, D_2 die sagittale katoptrische Brechkraft der hinteren Hornhautfläche darstellt. Wenn ϱ_2 den vertikalen Radius der hinteren Hornhautfläche, n den Brechungsindex der Hornhautsubstanz bezeichnet, ist somit

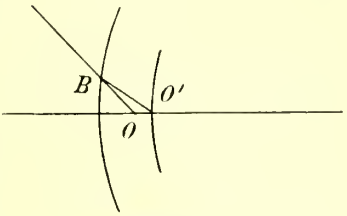


Fig. 20.

$$D_1=\frac{n\cos i'-\cos i}{\varrho_1} \qquad D_2=-\frac{2n\cos u'}{\varrho_2}$$

zu setzen, indem die Winkel auf dieselbe Weise bezeichnet werden wie oben bei der Ermittlung der Dicke.

Wenn in der Fig. 20 O' den Einfallspunkt in der hinteren Hornhautfläche darstellt, so ist O der Hauptpunkt des zusammengesetzten katadioptrischen Systems in bezug auf die sagittale Abbildung und BO gleich H, dem Abstande des Hauptpunktes vom Inzidenzpunkte in der vorderen Hornhautfläche, während $BO'=n\delta_1$ ist. Wie aus der Figur ohne weiteres hervorgeht, ist

$$n\delta_1 : H = \sin u : \sin u',$$

während nach der Formel (4a) die Beziehung

$$1-\delta_1 D_1=\frac{\delta_1}{H}$$

gilt. Es ergibt sich

$$1-\delta_1 D_1=\frac{\sin u}{n\sin u'},$$

und man erhält schließlich für die sagittale Brechkraft des katadioptrischen Systems:

$$\frac{2\sin u}{n\sin u'}\left(\frac{n\cos i'-\cos i}{\varrho_1}-\frac{\sin u}{\varrho_2 \operatorname{tg} u'}\right)$$

Da die Größe der beiden vom Nernstlampenobjekte entstandenen Spiegelbilder sich umgekehrt wie die Brechkraft des betreffenden spiegelnden Systems verhalten muß, indem bei der erreichbaren Genauigkeit der Wert von L bei beiden Spiegelungen gleichgesetzt werden kann, und da das durch das zusammengesetzte katadioptrische System erzeugte Spiegelbild die Größe β_0 hat, so verhält sich der soeben ermittelte Brechkraftwert zu dem oben angegebenen Werte $-\frac{2\cos u}{\varrho_1}$ wie β zu β_0, woraus, wenn die durch die Messung bekannte Größe $\frac{\beta_0}{\beta}$ mit ε bezeichnet wird, die Formel

$$\frac{\varrho_1}{\varrho_2}=\frac{\operatorname{tg} u'(n\cos i'-\cos i)}{\sin u}+\frac{n\sin u'\operatorname{tg} u'}{\varepsilon\sin u\operatorname{tg} u}$$

resultiert.

Den **Ort der Pupille** in bezug auf die Achse der Hornhautellipse bestimmte Helmholtz durch zwei Linien, welche sich im Mittelpunkte derselben schneiden, indem als Kriterium dafür, daß die Ophthalmometerachse durch den Mittelpunkt der Eintrittspupille geht, das Hornhautspiegelbild einer kleinen Lichtquelle so eingestellt wurde, daß bei geeigneter Stellung der Ophthalmometerplatten die Doppelbilder derselben in entgegengesetzten Randpunkten der Doppelbilder der Pupille sichtbar waren. Da die Hornhautellipse nach Helmholtz ohne Rücksicht auf die Lage der Pupille berechnet wird, so dürfte auch mit Ausgang von dieser Ellipse keine sicherere Methode gefunden werden können. Wenn man aber von der oben als optischen Achse definierten Hornhautnormale ausgeht, welche durch den Mittelpunkt der Pupille geht, so vereinfacht sich die Untersuchung wesentlich, indem man nur diese Achse zu ermitteln und eine durch den Mittelpunkt der Pupille gehende Linie auf schon angegebene Weise trigonometrisch zu verfolgen hat.

Die Orientierung der optischen Achse in bezug auf die Visierlinie wird am einfachsten dadurch bestimmt, daß man am Objektivende eines Fernrohres oder des Ophthalmometers eine runde weiße Scheibe mit durchbohrtem Zentrum befestigt und durch passende Aufstellung eines Fixationszeichens das Spiegelbild derselben in der Pupille zentriert. Dieselbe muß dabei gerade genug beleuchtet werden, damit sie die mittlere Größe von 4 mm Durchmesser habe, bei welcher die Achse bestimmt werden soll. Wird dann auch der hinreichend hell erleuchteten Scheibe ein solcher Durchmesser gegeben, daß das Spiegelbild derselben etwa 3 mm Durchmesser hat, so ist die Untersuchung in der Regel sehr leicht und mit hinreichender Genauigkeit auszuführen. Dieselbe ergibt die Ebene, welche durch die optische Achse und die Visierlinie geht, und den Winkel, welchen die beiden Linien einschließen. Am einfachsten bringt man das Fixationszeichen an der um die Fernrohrachse drehbaren Scheibe an, wo es längs einem Radius verschoben werden kann. Zur Ermittlung sehr genauer Resultate empfiehlt es sich, die oben angegebene Kontrollmethode von Helmholtz anzuwenden, indem zwei Glühlämpchen symmetrisch zur Ophthalmometerachse in einer die Verdopplungsebene senkrecht schneidenden Linie am Plattengehäuse angebracht werden, und dieses bei der Untersuchung stets so gedreht wird, daß das Fixationszeichen in der Verdopplungsebene liegt. Man kann dabei die Verdopplungsgröße mit den Platten entweder so wählen, daß sämtliche vier Spiegelbilder in Randpunkten der Pupille sichtbar sind, oder so, daß die zur Verdopplungsebene senkrechten, je zwei der Spiegelbilder verbindenden Linien die betreffenden Randpunkte der Pupillenbilder berühren. Im letzteren Falle ist die Verdopplungsgröße gleich dem Halbmesser der Eintrittspupille.

In einem Auge, dessen optische Achse auf diese Weise bekannt worden ist, erhält man den Abstand der Pupille vom Hornhautscheitel, wenn man in einer, einen endlichen Winkel mit dieser Achse bildenden Linie ein Hornhautspiegelbild im Zentrum der Pupille sieht und dabei den Winkelabstand der Fernrohrachse von der optischen Achse und von der Lichtquelle mißt, wonach ersterer als der Wert von u, die Hälfte des letzteren mit negativem Vorzeichen als i in die oben angegebenen Formeln einzusetzen

sind. Es ist dabei unnötig, mit der Brechung in der hinteren Hornhautfläche zu rechnen, sondern man führt für n den Brechungsindex des Kammerwassers ein und erhält im Werte von s' den Ort der Pupille mit derselben Rechnung wie bei der Messung der Hornhautdicke. Bei der praktischen Ausführung der Untersuchung kann man unter Anwendung der weißen Scheibe die Fernrohrachse an derselben vorbeigehen lassen und das Spiegelbild durch Verschieben der Fixationsmarke zentrieren, bei der Anwendung des Ophthalmometers von Helmholtz nach der ursprünglichen Vorschrift ein einziges Glühlämpchen anwenden, welches auch bei feststehendem Fixationszeichen verschiebbar gemacht werden kann. Schwierigkeiten können bei astigmatischen Hornhäuten entstehen, wenn die Visierlinie und die optische Achse nicht in einem Hauptschnitte liegen. Ist aber dies der Fall, oder ist nur ein physiologischer Astigmatismus vorhanden, so gelingt es gewöhnlich ohne Schwierigkeit, eine durch die optische Achse des Auges gehende Ebene zu finden, welche die Ophthalmometerachse und das Zentrum der Lichtquelle enthält, während das Spiegelbild desselben in der Eintrittspupille zentriert ist. In den best gebauten Augen, welche allein zu physiologischen Untersuchungen angewendet werden sollten, fällt diese Ebene mit der Symmetrieebene des Auges zusammen, welche, wenn vorhanden, durch die Bestimmung der optischen Achse bestimmt ist. Bei solchen Augen hat man somit Fixationszeichen, Zentrum der Lichtquelle und Fernrohrachse in diese Ebene zu verlegen, um das exakteste Resultat zu erhalten.

Läßt man bei diesem Versuche das Fernrohrobjektiv fixieren, so ergibt derselbe den Einfallswinkel der Visierlinie, und es folgt hieraus, daß es genügt, denselben und den Winkel, den diese Linie mit der optischen Achse bildet, zu kennen, um den Ort der Pupille zu berechnen. Es dürfte sich aber allgemein empfehlen, zu dieser Berechnung einen größeren Wert des Einfallswinkels zu wählen; denn da es sich darum handelt, den Schnittpunkt zweier Linien zu ermitteln, so ist es einleuchtend, daß die Beobachtungsfehler eine um so größere Bedeutung gewinnen, je kleiner der zwischen beiden Linien eingeschlossene Winkel ist. Auf der anderen Seite empfiehlt es sich nicht, allzu große Einfallswinkel zu wählen, wofern man mit dem Krümmungsradius der optischen Zone der Hornhaut rechnen will.

Ersichtlicherweise kann nach dieser Methode der Ort der Pupille ebensogut bestimmt werden, wenn der Durchmesser derselben unter dem angegebenen Maße liegt, obwohl die durch den Mittelpunkt gehende Hornhautnormale bei sehr kleiner Pupille die an eine optische Achse des Auges zu stellenden Anforderungen nicht immer so gut erfüllt. Bei einem 4 mm übersteigenden Pupillendurchmesser verliert aber die Methode an Exaktheit, je größer die Pupille wird, da wegen der Asymmetrie der Hornhaut das Zentrum der Eintrittspupille nicht das optische Bild des Mittelpunktes der anatomischen Pupille darstellt, welche Fehlerquelle offenbar mit zunehmender Pupillenweite um so mehr in die Wagschale fallen muß, ein je größerer Teil der Pupille außerhalb der optischen Zone der Hornhaut liegt. Überhaupt darf man sich über die Exaktheit der Messungsergebnisse keine Illusionen machen, sondern es empfiehlt sich im Gegenteil, dieselbe durch Wiederholen der Messungen unter verschiedenen Einfallswinkeln und mit der zur optischen Achse symmetrischen Versuchsanordnung in jedem Falle,

wo größere Anforderungen gestellt werden, zu prüfen. Um die Genauigkeit zu steigern, dürfte es kein anderes Mittel geben als die Helmholtzsche Schmiegungsellipse oder noch besser die durch multiple Messungen in dem zur Untersuchung angewendeten Hornhautschnitt auf oben angegebene Weise ermittelte Hornhautform den Rechnungen zugrunde zu legen, wobei diese aber wesentlich komplizierter werden. Dagegen bedingt die Vernachlässigung der Brechung in der hinteren Hornhautfläche bei mäßigen Einfallswinkeln nur einen Fehler von etwa $^1/_{100}$ mm, wovon ich mich durch vergleichende Rechnungen überzeugt habe.

Zur Ermittlung der Tiefe der vorderen Kammer verwendete Helmholtz eben die angegebene Methode der Bestimmung des Ortes der Pupille. Ob der so erhaltene Wert für die Vorwölbung der vorderen Linsenfläche innerhalb des Pupillargebietes korrigiert werden soll, scheint mir zweifelhaft, da die Iris tatsächlich nicht unendlich dünn ist, und die Pupille bei der Einstellung unter endlichem Winkel der Ophthalmometerachse mit der optischen Achse des Auges in perspektivischer Verkürzung gesehen wird. Will man eine solche Korrektion einführen, so empfiehlt es sich, dazu die Parabelgleichung anzuwenden, laut welcher der vordere Linsenscheitel um den Betrag $\frac{R^2}{2\varrho}$ vor der Pupillarebene liegt, wenn R den Halbmesser der Pupille und ϱ den Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche darstellt.

Eine andere Methode, dasselbe Ziel auf demselben Wege zu erreichen, rührt von Mandelstamm und Schöler[1]) her. Dieselbe stellt sozusagen eine Verbesserung des Kornealmikroskopes von Donders dar, mit welchem die Messung durch sukzessive Einstellungen auf die eventuell durch Calomel sichtbar gemachte vordere Hornhautfläche und auf den Irisrand bewerkstelligt wurde. Die wegen der Schwierigkeit, das Auge während der beiden Einstellungen ruhig zu halten, in der Duplizität derselben enthaltene Fehlerquelle wurde dadurch beseitigt, daß an Stelle der vorderen Hornhautfläche ein von derselben entworfenes Spiegelbild als Vergleichspunkt diente, dessen Ort in die Ebene der Eintrittspupille verlegt wurde, so daß nur eine Einstellung nötig war. Zu diesem Zwecke befand sich zwischen Mikroskop und Hornhaut eine unbelegte spiegelnde Glasplatte, durch welche Licht in der Richtung der Achse des Mikroskopes in das Auge geworfen, während durch optische Mittel das Spiegelbild der Lichtquelle an den richtigen Ort verlegt wurde. Der berechnete Ort des Hornhautspiegelbildes ist dann der Ort der Eintrittspupille. Die Czapskische binokulare Hornhautlupe wurde neuerdings auf Anregung Ambergs[2]) für diese Methode eingerichtet.

Von den Methoden, die Tiefe der vorderen Kammer ohne Anwendung des Pupillenrandes als Einstellungsobjekt zu messen, kommt in erster Linie die oben zur Messung der Dicke der Hornhaut beschriebene in Betracht. Wegen des asymmetrischen Baues der Hornhaut empfiehlt es sich auch hierbei, durch eine hinreichende Anzahl von Vorversuchen eine Stellung des

1) L. Mandelstamm und H. Schöler, Eine neue Methode zur Bestimmung der optischen Konstanten des Auges. Arch. f. Ophth. XVIII. 1. 1872. S. 155.

2) H. Amberg, Über eine Modifikation des Czapskischen Kornealmikroskopes zur Bestimmung der Vorderkammertiefe sowie der übrigen optischen Konstanten des Auges. Klin. Monatsbl. f. Augenheilkunde. XLVII. 2. 1909. S. 60.

Auges zu ermitteln, bei welcher der Einfallswinkel, nachdem Fernrohr und ophthalmometrische Nernstlampen den Platz gewechselt haben, annähernd denselben Wert hat, wobei der Berechnung der Mittelwert der Ergebnisse einer Serie in beiden Einfallsrichtungen ausgeführten Untersuchungen zugrunde gelegt wird. Ein Öffnungswinkel von 20° ist vollkommen genügend. Wegen der relativ schwachen Intensität der in der vorderen Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder tut man gut, das Glühlämpchen entweder mit verminderter Stromstärke brennen zu lassen oder durch Vorschalten eines roten oder andersfarbigen lichtabsorbierenden Glases auf die passendste Lichtstärke zu bringen. Von der Exaktheit der Methode gilt das oben Gesagte. Wäre die optische Zone der Hornhaut wirklich exakt sphärisch gekrümmt, so würde man mit derselben den Abstand der vorderen Linsenfläche von der vorderen Hornhautfläche längs der den beiden Flächen gemeinsamen Normale erhalten.

Die bisher sicherste Methode zur direkten Messung der Tiefe der vorderen Kammer dürfte die oben beschriebene von Blix sein. Von sonstigen Methoden wären hier nur noch die von Hegg[1]) mit stereoskopischem Instrumente und wandernder Marke sowie die von Grönholm[2]) mit dem Orthoskope zu erwähnen.

Der Ort der hinteren Linsenfläche kann, wenn es sich um einigermaßen zuverlässige Werte handelt, nur mit der von Helmholtz angewendeten, hier schon mehrfach besprochenen Methode erhalten werden. Der Einfachheit wegen empfiehlt es sich, auch bei dieser Untersuchung durch Vorversuche eine solche Stellung von Lichtquelle und Fernrohr zu ermitteln, daß die Einfallswinkel in der Hornhaut annähernd gleiche Werte haben. Bei der trigonometrischen Rechnung wird man, je nach der erzielten Exaktheit, die Krümmung der optischen Zone der Hornhaut, die Schmiegungsellipse oder die durch multiple Messungen der verschiedenen Krümmungsradien im angewendeten Hauptschnitte ermittelte exakte Form benutzen. Zur Ausführung derselben muß die Krümmung der vorderen Linsenfläche bekannt sein, und man hat, wenn es sich um genaue Resultate handelt, die Form derselben am besten als parabolisch zu behandeln. Dabei ist es aber auch nicht angängig, mit einem Totalindex der Linse zu rechnen. Eigentlich sollte man unter Anwendung der von mir angegebenen Formeln den gekrümmten Lichtweg in der Linsensubstanz berechnen, was aber sehr umständliche Rechnungen erfordert. Es dürfte auch, bis die Form der vorderen Linsenfläche näher bekannt wird, hinreichend sein, wenn man an Stelle dieses krummlinigen Lichtweges den in der äquivalenten Kernlinse gebrochenen Strahl setzt. Am einfachsten gestaltet sich die Rechnung, wenn die Krümmungsradien der Hornhaut in den beiden zum Durchgange des Lichtes angewendeten Punkten annähernd gleiche Werte haben, wobei man den Mittelpunkt der tangentialen Krümmung in die trigonometrischen Formeln einführt und das ganze System als ein Umdrehungssystem behandelt. Bei der sukzessiven Anwendung der Formeln auf mehrere Flächen

1) E. Hegg, Eine neue Methode zur Messung der Tiefe der vorderen Augenkammer. Arch. f. Augenheilkunde. XLIV. Erg.-Heft. 1901. S. 84.

2) V. Grönholm, Eine einfache Methode die Tiefe der vorderen Augenkammer zu messen. Skand. Arch. f. Physiologie. XIV. 1903. S. 235.

empfiehlt es sich, die in der technischen Optik gebräuchliche Bezeichnung einzuführen, indem beispielsweise $u'_2 = u_3$ den Öffnungswinkel des Strahles nach dem Durchgang durch die zweite Fläche und vor dem Einfall in die dritte, $n'_2 = n_3$ den Brechungsindex des zwischen diesen Flächen liegenden Mediums darstellt, während der Unterschied $s'_2 - s_3$ durch die längs der Achse gemessene Dicke des zwischen denselben belegenen Mediums erhalten wird.

Die Krümmung der Linsenflächen soll unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampen direkt mit dem Ophthalmometer von Helmholtz nach der oben für die hintere Hornhautfläche angegebenen Methode gemessen werden. Bei der schiefen Inzidenz wird die genaue Ausführung der Messung sehr erleichtert, und die Messung des sagittalen Krümmungsradius anstatt des tangentialen setzt auch den Einfluß der durch die Asymmetrie des Auges bedingten Fehlerquellen wesentlich herab. In den Fällen, wo die Behandlung des optischen Systems des Auges als ein Umdrehungssystem erlaubt erscheint, ist auch die exakte Berechnung nach dieser Meßmethode sehr einfach. Für die Brechkraft eines beliebigen zusammengesetzten Systems habe ich eine allgemeingültige Summenformel [1]) angegeben, welche für die sagittale Brechkraft eines aus m Flächen bestehenden Umdrehungssystems längs einem beliebigen, die Umdrehungsachse schneidenden Hauptstrahle die Form

$$D_{1\,m} = n_1\, n'_m \sin u_1 \sin u'_m \sum_{m} \frac{D}{n n' \sin u \sin u'}$$

annimmt. Wird das Lieht im Schnittpunkte der m-ten Fläche mit der Achse reflektiert, so besteht das katadioptrische System aus $2m - 1$ Flächen, und der Brechkraftwert desselben erhält, wenn die Lichtquelle in Luft belegen ist, die Form,

$$\frac{2 \sin u_1 D_1}{n'_1 \sin u'_1} + \frac{2 \sin^2 u_1 D_2}{n_2 n'_2 \sin u_2 \sin u'_2} + \ldots\ldots - \frac{2 \sin^2 u_1}{n_m \sin u_m \operatorname{tg} u_m \varrho_m}$$

indem die dioptrischen Einzelsysteme paarweise die gleiche Brechkraft haben. Die einzuführenden Glieder, welche der dritten, vierten usw. Fläche entsprechen, haben genau die analoge Form wie das der zweiten Fläche entsprechende. Das erste und letzte Glied sind schon durch die Berechnung der Krümmung der hinteren Hornhautfläche bekannt geworden. Für D ist überall die sagittale Brechkraft einzusetzen. Die hierzu nötigen Einfalls- und Brechungswinkel, sowie die Öffnungswinkel der Strahlen sind durch die Ermittlung des Ortes der betreffenden Fläche bekannt geworden.

Für den Fall, daß man nur einen weniger genau berechneten Wert braucht, kann man auch aus der durch die Messung ermittelten Brechkraft des betreffenden katadioptrischen Systems den Krümmungsradius aus der Formel (4a) S. 13 berechnen, indem, wenn ϱ_m den gesuchten Radius bezeichnet, $D_2 = -\frac{2 n_m}{\varrho_m}$ gesetzt wird, und D_1 die Brechkraft des vor der spiegelnden Fläche befindlichen optischen Systems, δ_1 den reduzierten Abstand derselben Fläche vom zweiten Hauptpunkte dieses Systems darstellt.

1) S. z. B. meine Bearbeitung der Helmholtzschen Dioptrik S. 241.

Während die Zuverlässigkeit der Ophthalmometrie der vorderen Linsenfläche wohl nach dieser Methode in geeigneten Fällen als befriedigend angesehen werden muß, so ist man noch weit davon entfernt, dasselbe von den Messungen des Ortes und der Krümmung der hinteren Linsenfläche sagen zu können. Teils ist nämlich die nach aller Wahrscheinlichkeit nicht symmetrische Form der vorderen Linsenfläche nicht mit hinreichender Genauigkeit bekannt, und teils sind zur exakten Verwertung der Messungen, wie aus dem Obenstehenden hervorgeht, sehr komplizierte Rechnungen erforderlich, welche wiederum multiple Messungen der verschiedenen Radien in dem verwendeten Hauptschnitte voraussetzen. Wenn dies nun auch betreffs der Hornhautkrümmung geschehen kann, so liegen bisher keine Untersuchungen vor, welche beweisen, daß solche Messungen an der vorderen Linsenfläche mit hinreichender Genauigkeit praktisch ausführbar sind. Die Form dieser Fläche ist zwar am toten Auge unter Beobachtung nötiger Vorsichtsmaßregeln von Dalén[1]) gemessen und mit der von mir für die Hornhaut angegebenen Methode berechnet worden, wodurch sich eine beträchtliche Abflachung nach der Peripherie ergab. Zur quantitativen Bestimmung der Flächenform im lebenden Auge dürften aber diese Untersuchungen wohl nicht angewendet werden können, und wenn man auch mit denselben einen schematischen Durchschnitt der vorderen Linsenfläche konstruieren wollte, so würde die Ophthalmometrie der hinteren Linsenfläche wenig dadurch gefördert werden, da die Untersuchungen doch kaum in so großer Anzahl vorgenommen werden können, daß eine schematische Linsenform zugrunde gelegt werden kann. Wenn oben das Paraboloid als die vorläufig bei der Berechnung anzuwendende Form angegeben wurde, so ist dies nur ein Mittel, der wahrscheinlichen Form näher kommen zu können. Im lebenden Auge wurde die Form der Linsenflächen von Besio[2]) mit der Methode von Tscherning[3]) untersucht.

Das wesentliche dieser Methode besteht in der Vereinfachung der Untersuchung und der Rechnung sowie in der Ermittlung der Krümmungsradien durch trigonometrische Verfolgung von Strahlen, welche durch die Krümmungsmittelpunkte gehen. Nachdem eine Zentrierungsachse bestimmt worden ist, wird, um z. B. den Ort des Krümmungsmittelpunktes der vorderen Linsenfläche zu bestimmen, bei endlicher Neigung der Fernrohrachse zu dieser Zentrierungsachse ein Hornhautspiegelbild mit dem in der vorderen Linsenfläche entstandenen Spiegelbilde einer am Fernrohr befestigten Lichtquelle kollimiert. Der Winkelabstand der das Hornhautspiegelbild erzeugenden Lichtquelle von der Fernrohrachse ist der doppelte Einfallswinkel, während der Öffnungswinkel des Strahles durch den zwischen letztgenannter Achse und Zentrierungsachse eingeschlossenen Winkel gegeben ist. Lampen, Fernrohr und Fixationsmarke sind an einem Gradbogen befestigt („Ophthalmophakometer"). Während somit bei der Methode von Helmholtz unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampen ein Krümmungs-

1) A. Dalén, Ophthalmometrische Messungen an der toten menschlichen Kristalllinse. Mitt. a. d. Augenklinik d. Carol. Med. Chir. Inst. z. Stockholm. 1905.

2) E. Besio, La forme du cristallin humain. Journal de physiologie et de pathologie générale. III. 1901. S. 547, 761, 783.

3) M. Tscherning, Optique physiologique. Paris 1898.

radius durch eine einzige Messung erhalten wird, und ein Fehler in dem Werte des Ortes der Fläche relativ wenig auf das Resultat einwirkt, so ermittelt Tscherning den Krümmungsradius durch die Differenz von zwei Messungen, in welchen der betreffende Fehler unvermindert zur Geltung kommt und sogar im Endresultate durch Summierung verdoppelt werden kann. Hierzu kommt noch, daß, wie oben auseinandergesetzt wurde, die Ortsbestimmung mit trigonometrischer Rechnung die unsicherste unter den ophthalmometrischen Methoden darstellt und wohl eine komplizierterc Rechnung erheischen könnte, keineswegs aber eine Vereinfachung derselben zuläßt. In exakt zentrierten, aus sphärischen Flächen bestehenden Umdrehungssystemen wäre wohl die Methode von Tscherning zuverlässiger, bei der Anwendung auf das Auge werden aber durch dieselbe so viele und so große Fehlerquellen eingeführt, daß die Ergebnisse nicht ohne Kontrolle mit exakter Methode angewendet werden dürfen. Daß aber die Ermittlung des Ortes eines Krümmungsmittelpunktes auf trigonometrischem Wege unter Anwendung exakter Berechnungsmethoden ein zu gewissen Zwecken verwertbares ophthalmometrisches Mittel darstellen kann, sei hiermit nicht in Abrede gestellt.

In das Gebiet der Ophthalmometrie gehört auch die Berechnung des schematischen Wertes der Brechkraft der Linsensubstanz, welcher zur Berechnung des Ortes und der Krümmung der hinteren Linsenfläche aus den Messungsresultaten notwendig ist. Wenn es sich nur um approximative Berechnungen handelt, so kann man dabei die Linse als homogen betrachten, wobei der betreffende Totalindex bekannt sein muß. Nachdem ich durch Ermittlung der Abbildungsgesetze für heterogene Medien bewiesen hatte, daß die Matthießensche Annahme, daß der Totalindex sich aus den durch refraktometrische Untersuchungen gewonnenen Resultaten berechnen ließe, grundlos ist, war es notwendig, denselben bzw. die Brechkraft der Linse durch direkte Untersuchungen zu bestimmen. Zu diesem Zwecke gibt es vorläufig kein anderes Mittel, als die durch Extraktion der Linse entstehende Refraktionsänderung des Auges in Rechnung zu ziehen. Dies geschieht am einfachsten auf folgende Weise. Die allgemeinen, auf die Hauptpunkte der Hornhaut bezogenen Abbildungsgleichungen

$$B = A + D_h \qquad KB = A$$

ergeben, wenn H_h den Abstand des ersten Hauptpunktes des Hornhautsystems von der vorderen Hornhautfläche, δ den reduzierten Abstand des optischen Zentrums der Linse vom zweiten Hauptpunkte dieses Systems, $\varkappa$ den Vergrößerungskoeffizienten in demselben optischen Zentrum und x den scheinbaren Ort desselben in bezug auf die vordere Hornhautfläche darstellen, somit ABK durch $\frac{1}{x - H_h} \frac{1}{\delta} \varkappa$ ersetzt werden:

$$\varkappa = 1 - \delta D_h \qquad x = \frac{\delta}{\varkappa} + H_h$$

Der Abstand der Hauptpunkte der Linse voneinander kann mit Hinsicht auf die Genauigkeit, mit welcher die Refraktionsänderung klinisch bestimmt werden kann, ohne Schaden vernachlässigt werden, wobei an deren Stelle das optische Zentrum der Linse in denjenigen Punkt verlegt wird, dessen Abstände von den beiden Linsenflächen im schematischen Auge sich wie die

Krümmungsradien verhalten. Nach Einsetzen des so definierten Wertes von δ ergeben sich aus den Gleichungen $\varkappa$ und x.

Wird die Brechkraft von Hornhaut-, Linsen- und Vollsystem mit bzw. $D_h D_l D_t$ bezeichnet, so hat man laut der allgemeinen Formel (3b) für die Zusammensetzung zweier Systeme

$$D_t = D_h + \varkappa D_l$$

Stellen weiter bei der scharfen Abbildung im Vollauge bzw. im linsenlosen Auge AB bzw. $A_o B_o$ die im scheinbaren bzw. wirklichen Orte des optischen Zentrums der Linse gemessenen reduzierten Konvergenzen der Strahlenbündel dar, so ist

$$\varkappa^2 B = A + \varkappa D_t \qquad \varkappa^2 B_o = A_o + \varkappa D_h$$

und es resultiert, da die im linken Membrum stehenden Werte in beiden Gleichungen identisch sind,

$$A_o - A = \varkappa^2 D_l$$

Durch diese Formel erhält man aus der klinisch ermittelten, auf den Ort x bezogenen Refraktionsänderung unter Berücksichtigung der Aberration im linsenhaltigen Auge den schematischen Wert der Brechkraft der Linse, mit welchem wiederum unter Anwendung der schematischen Werte der Krümmungsradien der Linsenflächen der Totalindex der Linse bzw. unter Anwendung der Ergebnisse der refraktrometrischen Untersuchungen die Konstanten der schematischen äquivalenten Kernlinse berechnet werden. Je nach der erzielten Genauigkeit wird man seinen Rechnungen den Totalindex oder die Kernlinse zugrunde legen.

Daß die Bestimmung der Brechkraft der Linse nicht nach Herausnahme derselben aus dem toten Auge mit Anspruch auf Zuverlässigkeit vorgenommen werden kann, beruht darauf, daß dieselbe von dem Verlaufe der Isoindizialflächen abhängig ist, und bei jeder Formänderung der Linse der Totalindex wechselt.

V. Spezielle Methoden zur Erforschung des Akkommodationsmechanismus.

Was zunächst die Methoden zur Beobachtung am lebenden Auge betrifft, so lehrt der erste Blick die die Akkommodation begleitende Pupillenverengerung kennen, und man braucht nur ein jugendliches Auge bei ausgiebiger Akkommodationsveränderung mit der Czapskischen binokularen Lupe zu untersuchen, um die stärkere Vorwölbung der Irisfläche, die Verminderung der Tiefe der vorderen Kammer im zentralen Teile und das Zurückweichen der peripheren Teile der Regenbogenhaut während des Akkommodationsaktes zu konstatieren. Werden zwei Lichtquellen — am besten ophthalmometrische Nernstlampen — wie oben zur Messung der sagittalen Krümmung einer Linsenfläche angegeben wurde — aufgestellt, so kann man direkt oder noch besser mit einem Fernrohre die akkommodative Größenveränderung der in den Linsenflächen entstehenden Spiegelbilder beobachten. Die ophtalmometrischen Methoden geben näheren Aufschluß über die quantitative Veränderung der Krümmungsradien und die Ortsveränderung der vorderen Linsenfläche, während eine akkommodative

Verschiebung der hinteren Linsenfläche, wie aus dem oben Gesagten hervorgeht, bisher nicht konstatiert ist, da sich gegenteilige Untersuchungsergebnisse durch die Fehlerquellen der Methoden erklären. Ophthalmometrisch wurde auch die akkommodative Verschiebung des Zentrums der Eintrittspupille konstatiert, während die wohl wenigstens teilweise mit derselben im Zusammenhang stehende akkommodative Richtungsänderung der Augenachse direkt unter Anwendung der ophthalmometrischen Nernstlampe beobachtet werden kann. Man stellt zu diesem Zwecke dieselbe mit vertikalem Spalte seitlich und etwas nach hinten vom untersuchten Auge auf, während das Licht auf dasselbe fällt, wonach die Lampe so weit nach hinten verschoben wird, bis kein Licht mehr die vordere Irisfläche trifft, sondern dasselbe sich am nasalen, die vordere Kammer begrenzenden Teile der Sklera in einen kleinen hellen Fleck sammelt, welcher von außen bequem sichtbar ist. Läßt man dabei das Auge ohne Richtungsänderung der Visierlinie akkommodieren, so bewegt sich oft der kleine Lichtfleck rückwärts näher dem Limbus als ein Zeichen dafür, daß das Auge eine kleine Drehung in temporaler Richtung ausführt. Die hierdurch bewiesene Änderung der Zentrierung des Auges während des Akkommodationsaktes stellt offensichtlich noch eine ernste Fehlerquelle der ophthalmometrischen Untersuchung dar, durch welche die akkommodative Veränderung des Ortes und der Krümmung besonders der hinteren Linsenfläche bestimmt wird.

Zur Beurteilung des Zusammenhanges zwischen der Pupillenverengerung und der Akkommodation genügen bekannte experimentelle und klinische Erfahrungstatsachen. So wird durch Kokain die Pupillenverengerung gehemmt, während die Akkommodation mehr oder weniger unbehindert ist, und wenn man nach dem Vorgange von Heß zuerst Homatropin bis zur erzielten Mydriasis, dann Eserin einträufelt, so ist in einem gewissen Stadium vor dem Eintritte der Myosis die maximale Akkommodation sehr leicht auszuführen. In Übereinstimmung hiermit können auch Augen mit kongenitalem Irismangel akkommodieren. Auf der anderen Seite lehrt die klinische Erfahrung, daß bei vollständiger diphterischer Akkommodationslähmung die das Nahesehen begleitende Pupillenverengerung bei kräftiger Konvergenz auf schönste Weise eintreten kann.

Wenn hieraus hervorgeht, daß kein wesentlicher Zusammenhang zwischen dem Mechanismus der Akkommodation und dem der Pupillenverengerung vorhanden ist, so wird auf der anderen Seite die Vertiefung der peripheren Teile der vorderen Kammer durch die gestaltliche Veränderung der Linse verursacht, indem die inkompressible Kammerflüssigkeit nicht durch die Pupille nach der hinteren Kammer entweichen kann. Daß wirklich dieser Mechanismus wirksam ist, und das Zurückweichen der peripheren Teile der Iris nicht, wenigstens nicht ausschließlich durch Muskelzug bewirkt wird, beweist ein Fall von Ulbrich[1]), wo in der Iris eine durch eine dünne Membran ausgekleidete Lücke vorhanden war, und die Membran sich bei der Akkommodation einstülpte. Daß wiederum die Pupillenverengerung nicht die mechanische Folge der akkommodativen Veränderung der Linsen-

1) H. Ulbrich, Zur Lehre von der intraokulären Flüssigkeitsströmung. Ber. über die 34. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg, 1907. S. 105.

form ist, wie man daraus hat schließen wollen, daß sich die Pupille bei der Entleerung der vorderen Kammer verengt, ist leicht einzusehen, da der Abstand des Pupillenrandes vom Irisansatze beim Zurückweichen der peripheren Iristeile vermehrt wird, so daß, wenn keine Sphinkterkontraktion einträte, eine Erweiterung der Pupille zustande kommen müßte.

Es geht aus dem Gesagten hervor, daß der Zusammenhang der akkommodativen Pupillenverengerung mit der Formveränderung der Linse nur durch die Innervation vermittelt wird, und daß die Pupillenverengerung, deren wesentliche Bedeutung in der Vermehrung der Tiefe der Abbildung liegt, nur insofern auf den Akkommodationsmechanismus einwirken kann, als die Gegenwart der Regenbogenhaut die Form der peripheren Teile der vorderen Linsenfläche mechanisch zu beeinflussen imstande sein kann. Ob dies überhaupt der Fall ist, läßt sich aber vorläufig nicht beurteilen.

In der Vorstellung, daß die Krümmung der peripheren Teile der vorderen Linsenfläche von prinzipieller Bedeutung für die Beurteilung des Mechanismus der Akkommodation wäre, hat Tscherning die Distorsion der in derselben entstehenden Spiegelbilder untersucht. Aus dieser läßt sich aber kein direkter Schluß ziehen, da auf den Distorsionswert sowohl die Krümmung wie die Lage des vorderen Linsenpoles einwirkt. Die oben zitierten Untersuchungen von Besio ergeben, wenn die Fehlerquellen der Methode unbeachtet bleiben, eine bei der Akkommodation zunehmende Abflachung der peripheren Teile der Linse. Sowohl diese Untersuchungen wie die Beobachtung der Distorsionsänderung erfordern die Kokainisierung, wenn dieselben bei einigermaßen ausgiebiger Akkommodation ausgeführt werden sollen. Das Ergebnis ist wohl vorläufig, daß die Frage nicht entschieden ist. Hauptsache ist aber, daß dieselbe keine wesentliche Bedeutung für unsere Kenntnis vom Akkommodationsmechanismus hat. Von Tscherning wurde auch die Untersuchung der Aberration während der Akkommodation in den Bereich der zur Erforschung des Akkommodationsmechanismus dienenden Methoden einbezogen. Seine Methoden waren aber, wie ich an anderer Stelle eingehend auseinandergesetzt habe, unzuverlässig, und die gesamten Untersuchungen haben nur das Resultat ergeben, daß die periphere Totalaberration des Auges in vielen Fällen während der Akkommodation negativ wird, und daß diese Erscheinung, welche in der Dioptrik der Kernlinse eine mathematische Erklärung findet, für den Akkommodationsmechanismus unwesentlich ist.

Durch die von Heß[1]) eingeführten Methoden wurde die im Endstadium der Akkommodation eintretende Dislokation der Linse in der Richtung der Schwerkraft entdeckt. Die entoptische Untersuchung einer kleinen in seiner Linse vorhandenen punktförmigen Trübung unter Anwendung eines sehr kleinen, 12 mm vor dem Auge befestigten Loches als Lichtquelle ergab bei kräftiger Akkommodationsanstrengung gegen Ende der entoptisch beobachteten Pupillenkontraktion eine Dislokation des entoptischen Schattens nach oben im Zerstreuungskreise. Die Verschiebung erfolgte bei beliebiger Kopfhaltung und vertikaler Pupillenebene stets in der der Wirkung der

1) C. Heß, Über einige bisher nicht gekannte Ortsveränderungen der menschlichen Linse während der Akkommodation. Ber. über die 25. Vers. der Ophth. Ges. Heidelberg 1896. S. 41. — Arbeiten aus dem Gebiete der Akkommodationslehre. Arch. f. Ophth. XLII, 1. S. 228 und 2. S. 80. XLIII, 3. S. 477.

Schwerkraft entgegengesetzten Richtung, während bei horizontaler Pupillenebene ohne Änderung der Fernpunktlage eine Zunahme der Akkommodationsbreite bei vornübergeneigtem, eine Abnahme bei hintenübergeneigtem Kopfe stattfand. Durch die Verschiebung des entoptischen Schattens wurde der Betrag des Herabsinkens der Linse teils bei starker willkürlicher Akkommodation teils nach Eserinisierung gemessen. Die Ergebnisse der Messungen wurden von Heine[1]) an der bei der Dezentration eintretenden Scheinverschiebung gesehener Objekte und an der Parallaxe der in der Hornhaut und in der hinteren Linsenfläche entstehenden Spiegelbilder bestätigt. Heß hatte durch objektive Untersuchungen teils konstatiert, daß im Zustande starker Akkommodation die Linse bei Augenbewegungen schlottert, wobei sogar die Iris am Schlottern teilnehmen kann, teils auch durch Beobachtung von Fällen mit Linsentrübungen bei fokaler Beleuchtung mit Lupenvergrößerung sowie durch Beobachtung der vom Linsenepithel herrührenden Zeichnung[2]) bewiesen, daß auch die vordere Linsenfläche das Herabsinken und die Schlotterbewegung mitmacht, während bei der Beobachtung der Spiegelbilder das der hinteren Fläche allein zu schlottern scheint und entweder allein oder doch in höherem Grade als das der vorderen Linsenfläche herabsinkt.

Eine ganz eigentümliche Methode hat Gertz in der oben S. 126 gewürdigten Untersuchung des sekundären katadioptrischen Bildes angewendet, welche ihm das Resultat ergab, daß im untersuchten Falle der hintere Linsenpol bei der Akkommodation keine merkliche axiale Verschiebung erfuhr, und daß die Krümmung der hinteren Linsenfläche in dem gemeiniglich angenommenen Grad akkommodativ zunahm. Da es sich hierbei nur um den Vergleich der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen eines und desselben Auges unter dem Einflusse ähnlicher Fehlerquellen handelt, so dürften sich die Fehler größtenteils aufheben und der Schluß berechtigt sein.

Die oben S. 98 gewürdigte akkommodative Verdopplung des hinteren Linsenbildes, welche nur für die Entstehung der Diskontinuitätsfläche von Bedeutung ist, und das in seltenen, besonders disponierten Augen beobachtete Akkommodationsphosphen Czermaks, aus welchem keine Schlüsse betreffs des Mechanismus der Akkommodation gezogen werden können, schließen die Reihe der am lebenden Auge unter vollkommen physiologischen Verhältnissen gemachten Beobachtungen ab.

Aus denselben hat sich ergeben, daß die Akkommodation in einer Krümmungszunahme der Linsenflächen besteht, welche hauptsächlich die vordere, in weit geringerem Grade die hintere Fläche betrifft und von einer Vorschiebung des vorderen Linsenpoles begleitet ist, sowie daß bei starker Akkommodation die Zonula entspannt wird. Daß diese Entspannung vornehmlich die zur vorderen Linsenfläche schräg von hinten kommenden Fasern betrifft, geht aus der Art des Herabsinkens der Linse hervor. Da nämlich das in der vorderen Fläche entstehende Spiegelbild entweder nicht oder aber jedenfalls weniger herabsinkt

1) L. Heine, Akkommodative Ortsveränderungen der Linse. Bericht über die 26. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1897. S. 20.

2) C. Heß, Beobachtungen über den Akkommodationsvorgang. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. XLII. 1904. S. 1.

als das der hinteren Fläche, die Linse somit eine Bewegung um den Krümmungsmittelpunkt der vorderen Fläche macht, so verschiebt sich die Anheftungsstelle dieser Fasern in der Längsrichtung derselben, was im besonderen nicht mit den schräg von vorn zur hinteren Linsenfläche gehenden Fasern der Fall ist. Diese müssen deshalb am wenigsten, jene am meisten entspannt sein.

Unter Zugrundelegung der Werte der Krümmungsänderung der Linsenflächen und der Vorschiebung des vorderen Linsenpoles sowie der bei einer bestimmten Krümmungsänderung eintretenden Refraktionsänderung des Auges ergibt sich zunächst die Brechkraft der Kernlinse im betreffenden Akkommodationszustande. Mit derselben und mit den mathematischen Ausdrücken der Bedingungen, daß bei der Formveränderung keine Kompression im Linsenzentrum stattfinde, sowie daß das von der größten geschlossenen Isoindizialfläche eingeschlossene Volumen bei der Formveränderung unverändert bleibe, lassen sich die Konstanten der Indizialgleichung der akkommodierenden Linse ermitteln. Mit Hilfe dieser Gleichung und der für die nicht akkommodierende Linse auf oben angedeutete Weise ermittelten kann man die Meridianschnitte der Isoindizialflächen für beide Zustände konstruieren. Durch einen Vergleich derselben miteinander lernt man die Hauptzüge des intrakapsulären Akkommodationsmechanismus kennen: die ausgiebigere axipetale Bewegung der der Linsenachse näher liegenden Teilchen und die axipetale Bewegung der den Ansatzstellen der Zonula, vornehmlich der vorderen, nächstliegenden, in der größten geschlossenen Isoindizialfläche enthaltenen Teile der Linsensubstanz. Beides hätte, wie ich gezeigt habe, a priori aus dem anatomischen Baue der Linse postuliert werden können, ebenso wie auch die durch ersteres Verhalten bedingte akkommodative Zunahme des Totalindex der Linse.

Daß der extrakapsuläre Akkommodationsmechanismus in einer axipetalen Bewegung der Ansatzstellen der Zonula, vornehmlich der vorderen, gipfelt, geht aus den oben referierten Untersuchungen von Heß hervor, und es erübrigt hier nur noch, die Methoden zu erwähnen, mit welchen derselbe näher untersucht wird.

An iridektomierten Augen sowie an Augen mit kongenitaler Irideremie wird nach dem Vorgange von Heß bzw. Großmann die nach Eserinisierung eintretende Veränderung in der Topographie der Ziliarfortsätze und im Aussehen des Linsenrandes bzw. die Abnahme des äquatorealen Durchmessers der Linse beobachtet. Letztere Veränderung scheint bisher im lebenden Auge nur im Großmannschen Falle[1]) mit Sicherheit beobachtet worden zu sein, wo aber Linse und Zonula wahrscheinlich nicht normal waren. An überlebenden enukleierten Menschenaugen ist aber dieselbe neuerdings von Heß[2]) konstatiert worden. Mit seiner neuen Methode, das äquatoreal halbierte Auge von hinten her unter starker Beleuchtung und Beobachtung mit der Binokularlupe zu untersuchen, konstatierte er in einem Falle, wo ein normales Auge hatte enukleiert werden müssen, und wo das-

1) Karl Großmann, The mechanism of accommodation in man. Ophth. Review. XXIII. 1904. S. 1.

2) C. Heß, Beiträge zur Kenntnis akkommodativer Änderungen im Menschenauge. Arch. f. Augenheilk. LXV. 1910. S. 170.

selbe 3 bis 4 Minuten nach der Enukleation zur Untersuchung kam, daß die elektrische Reizung hinreichend lange Zeit den Akkommodationsmechanismus auslöst, welcher auf diese Weise genau und bequem überblickt werden kann. Auch konnte er durch Formolhärtung während 12 bis 14 Stunden den Akkommodationsakt in vor dem Tode eserinisierten Augen fixieren, wobei die Härtung bei noch klar und durchsichtig gebliebenen Linsen ausreichend war, um bei äquatorealer Eröffnung die Gestaltveränderung der vorderen Hälfte der Hüllen zu vermeiden, welche bisher solche Untersuchungen vereitelt hatte. Bei vorhergehender Anwendung dieser Methode auf Tieraugen [1]) hatte er auch die Methode der Beobachtung der Spiegelbilder der Linse von hinten her in Anwendung genommen.

Am menschlichen Auge sind ferner Untersuchungen über die Einwirkung der Zonularspannung auf die Krümmung der Linsenvorderfläche von Dalén [2]) ausgeführt worden. Er konstatierte ophthalmometrisch eine Krümmungszunahme nach Durchschneidung der Zonula, nachdem die Linse unter Beobachtung besonderer Kautelen durch Abtragen der Hornhaut und Iris bloßgelegt worden war. Am überlebenden Kinderauge wurde von Heine [3]) festgestellt, daß sich der Akkommodationsmechanismus bei fenestrierter Sklera unbehindert und ohne die geringste Bewegung des in der Skleralöffnung hervorquellenden Glaskörpertropfens vollzieht. Ähnliche Resultate ergaben auch die oben angeführten Untersuchungen von Heß an überlebenden Mensehenaugen. (Am Affenauge hatte Beer dasselbe Resultat erhalten.)

An der Spitze der Reihe der Tierexperimente stehen unbestritten die klassischen Untersuchungen von Hensen und Völckers. [4]) Da die Hauptmasse der Muskelfasern, das meridionale Bündel, annähernd parallel zur Sklera verläuft, so stellte sich zunächst die Frage auf, ob bei der Kontraktion das hintere Ende nach vorn oder das vordere nach hinten gezogen wird. Es zeigte sich, daß, wenn am Äquator des Bulbus eine Nadel eingestochen wird, bei elektrischer Reizung des Ziliarmuskels an Hunden das äußere Ende der Nadel sich nach hinten bewegt, und daß kein Einstichpunkt gefunden werden kann, wo es sich nach vorn bewegt. Die bei der Akkommodation eintretende Verschiebung der inneren Augenhäute nach vorn konnte auch durch ein Fenster der Sklera beobachtet werden. Wurde dagegen die Hornhaut bis auf einen peripheren 2 mm breiten Saum abgetragen, so wurde die elektrische Reizung des Ziliarmuskels von einem Zurückweichen dieses Saumes begleitet. Außerdem wurde die Erschlaffung der Zonula bei der Ziliarmuskelkontraktion konstatiert.

Obwohl ein Druckunterschied zwischen Glaskörper und vorderer Kammer überhaupt nur in dem geringen, der Zonularspannung entsprechenden Betrage denkbar ist und eine durch den Mechanismus der Akkommodation auf direktem Wege hervorgerufene Druckerhöhung im Bulbusinnern nur

1) C. Heß, Untersuchungen zur vergleichenden Physiologie und Morphologie des Akkommodationsvorganges. Ebenda. LXII. 1909. S. 345.

2) a. a. O.

3) L. Heine, Ein Versuch über Akkommodation und intraokularen Druck am überlebenden Kinderauge. Arch. f. Ophth. LX, 3. 1905. S. 448.

4) V. Hensen und C. Völckers, Experimentaluntersuchung über den Mechanismus der Akkommodation. Kiel 1868.

durch Deformation der Hüllen verursacht werden kann, indem bei der Schnelligkeit des Akkommodationsaktes und bei der Viskosität der Flüssigkeiten eine unbehinderte Nachfüllung des Suprachorioidealraumes nicht stattfindet, sind doch eine stattliche Reihe von Untersuchungen diesem Gegenstande gewidmet worden. Nachdem die Methode der Manometrie des Auges schließlich durch die Arbeit von Wessely[1]) auf die jetzige Höhe gebracht worden war, und nachdem v. Pflugk eine akkommodative Druckerhöhung im Schildkrötenauge angegeben hatte, ergab die letzte Untersuchungsreihe von Heß[2]) unter Anwendung teils des Heringschen Mikromanometers an enukleierten Augen, teils auch der Wesselyschen Methode an ebensolchen Augen und an lebenden Affen, daß im Affenauge und im Hundeauge keine Beeinflussung des intraokularen Druckes nachgewiesen werden kann, während in enukleierten Augen von Vögeln und Reptilien sowie im Cephalopodenauge eine deutliche akkommodative Drucksteigerung eintritt. Bei verschiedenen Reptilien konnte die Deformierung des Auges konstatiert werden, während besonders für das Vogelauge diese wahrscheinlich die Drucksteigerung begleitende Erscheinung bisher nicht experimentell konstatiert wurde.

Die Methode der mikroskopischen Untersuchung des unter Anwendung von Eserin oder noch besser Nikotin in Krampf versetzten Ziliarmuskels in situ wurde von Heine[3]) zuerst an Tauben, dann an Affen angewendet. Nach den letzten Befunden der oben angeführten Untersuchungen von Heß zu urteilen, wird es wohl nicht lange dauern, bis diese Methode auch am Menschenauge zur Anwendung kommt. Dies ist schon mit der von v. Pflugk[4]) zuerst auf das Taubenauge angewendeten Gefriermethode der Fall gewesen. Was speziell die Beurteilung der akkommodativen Form der Linse an den mit dieser Methode erhaltenen Präparaten betrifft, muß man vor Augen haben, daß das Wasser beim Gefrieren unter gewaltiger Kraftentwicklung sein Volumen vermehrt, und daß die Art und Weise, auf welche hierdurch Deformitäten der Linse entstehen können, sich der Beurteilung entziehen. Jedenfalls darf man nicht mit v. Pflugk auf eine nach hinten gerichtete Konkavität der hinteren Linsenfläche schließen, bevor nicht dieselbe ophthalmometrisch im lebenden Auge konstatiert worden ist. Auf der anderen Seite liegen bisher keine ophthalmometrischen Messungen vor, welche eine solche mit Bestimmtheit ausschließen. Daß aber die Frage, ob sie vorhanden ist oder nicht, für den Mechanismus der Akkommodation ohne wesentliche Bedeutung ist, geht aus der mathematischen Untersuchung der Dioptrik der Kernlinse hervor.

1) K. Wessely, Experimentelle Untersuchungen über den Augendruck sowie über qualitative und quantitative Beeinflussung des intraokularen Flüssigkeitswechsels. Arch. f. Augenheilk. LX. 1908. S. 1.

2) C. Heß, Vergleichende Untersuchungen über den Einfluß der Akkommodation auf den Augendruck in der Wirbeltierreihe. Ebenda LXIII. 1909. S. 88.

3) L. Heine, Mikroskopische Fixierung des Akkommodationsaktes. Ber. über die 26. Vers. d. Ophth. Ges. Heidelberg 1897. — Physiologisch-anatomische Untersuchungen über die Akkommodation des Vogelauges. Arch. f. Ophth. XLV, 3. 1898. S. 469. — Die Anatomie des akkommodierten Auges. Ebenda XLIX, 1. 1899. S. 1.

4) A. v. Pflugk, Über die Akkommodation des Auges der Taube. Wiesbaden 1906. — Die Fixierung der Wirbeltierlinsen, insbesondere der Linse des neugeborenen Menschen. Klin. Monatsbl. f. Augenheilkde. XLVII, 2. 1909. S. 1.

Tscherning und seine Schüler hatten gezeigt, daß man eine herausgenommene Tierlinse unter gewissen Verhältnissen so an der Zonula spannen kann, daß die Krümmung des Linsenpoles bei der Spannung zunimmt. Heß[1]) bewies aber, daß im frischen Affenauge nach Entfernung eines Teiles der Sklera ohne Verletzung der Uvea und nach Abtragung von Hornhaut und Iris ein Zug an der Zonula eine Krümmungsabnahme der vorderen Linsenfläche zur Folge hat.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit dürften hiermit die wichtigsten Methoden zur Erforschung des Akkommodationsmechanismus, wenn auch nur in aller Kürze, erwähnt worden sein. Durch verschiedene andere Methoden ergeben sich Resultate, welche auch Schlüsse betreffs desselben in gewissem Grade zulassen Um nur ein Beispiel zu erwähnen, sei hier einer soeben publizierten Untersuchung von Grönholm[2]) gedacht. Durch Messungen der zur Anspannung bzw. Erschlaffung der Akkommodation nötigen Zeit konstatierte er zunächst das Ergebnis der Untersuchungen seiner Vorgänger, daß erstere Zeit länger ist als letztere, fand aber dann auch, daß die Akkommodation bei zunehmendem Alter verzögert wird, was in höherem Grade von der Anspannung als von der Erschlaffung gilt, und daß besonders die Einstellung des Nahepunktes bei älteren Personen erschwert ist, während die Abspannung mit fast konstanter Geschwindigkeit innerhalb des ganzen manifesten Akkommodationsgebietes verläuft. Da eine solche Verzögerung der Anspannung um so weniger eine entsprechende Änderung in der Wirkung des Ziliarmuskels andeuten kann, als die Akkommodationsbreite mit dem Alter abnimmt und in Übereinstimmung hiermit der Nahepunkt durch eine weniger ausgiebige Kontraktion des Muskels erreicht wird, während auf der anderen Seite die Amplitude der Kontraktion vom Alter unbeeinflußt bleibt, so dürfte dieselbe nur den Altersveränderungen der Linse zugeschrieben werden können. Daß diese der Formveränderung einen Widerstand bieten, ist wohl bekannt. Da nun dieser Widerstand eine stärkere Einwirkung auf die Anspannungs- als auf die Erschlaffungszeit der Akkommodation ausübt, so dürfte man mit Grönholm hieraus den Schluß ziehen können, daß bei der Anspannung der Akkommodation die auf die Linse wirkende Kraft geringer ist als bei der Erschlaffung, was im vollen Einklange damit steht, daß im ersteren Falle die Formveränderung nur durch die Elastizität der Linsenkapsel, im letzteren durch die bedeutend größere Elastizität der Chorioidea bewirkt wird.

1) a. a. O. Klin. Monatsbl. f. Augenheilk. 1904.

2) V. Grönholm, Studien über den zeitlichen Verlauf der Akkommodation und der mit der Akkommodation assoziierten Fusionsbewegungen der Augen unter normalen und einigen pathologischen Verhältnissen. Arch. f. Augenheilk. LXVII, Erg.-Heft 1910. S. 119.

3. Abteilung:

Sinnesphysiologie III[b]

II.

Die nicht-akustischen Funktionen des inneren Ohres

von

J. Rich. Ewald in Strassburg.

(Mit 8 Figuren.)

Eine besondere Methodik für die Untersuchung der nicht-akustischen Funktionen des inneren Ohres ist erst nach Goltz' berühmten Auseinandersetzungen im Jahre 1870 (30) ausgebildet worden. Aber das erste grundlegende Tatsachenmaterial zum Aufbau der neuen Lehre hat schon Flourens (25) geliefert. Hier soll zwar nur die Methodik besprochen werden, doch läßt sich diese nicht ohne Rücksichtnahme auf die Resultate kritisch behandeln. Das Interesse für jede Methode hängt natürlich von den Resultaten ab, die durch sie gewonnen werden, und die Wertschätzung des Resultats wieder von der Güte der Methode. Wir wollen daher, den Fortschritten in der Erkenntnis der Labyrinthfunktionen entsprechend, die Besprechung der Methodik in zwei Perioden teilen, von denen sich die erste auf Flourens und Goltz bezieht, während die zweite erst nach Goltz beginnt.

I. Periode.

Wenn man bedenkt, wie geringe anatomische Kenntnisse und wie unvollkommene Hilfsmittel Flourens zu Gebote standen, so kann man nur staunend und bewundernd der Technik des großen Physiologen die höchste Anerkennung zollen. Ohne Anästhesierung, ohne Taubenhalter, ohne stereoskopische Lupe und ohne unsere genauen anatomischen und topographischen Kenntnisse hat er die Bogengänge sämtlich derart frei gelegt, daß er sie einzeln durchschneiden konnte. Und dies ist ihm nicht nur bei Tauben geglückt, sondern auch bei kleinen Singvögeln, wie Sperlingen. Auch hat er an jungen Kaninchen die Durchschneidungen ausgeführt. Dies ist jedenfalls für die damalige Zeit und bei Berücksichtigung des Umstandes, daß es sich um die ersten Versuche auf diesem Gebiete handelt, eine sehr hervorragende Leistung.

Wie verhält sich aber Flourens' Methodik der heutigen gegenüber? Er schnitt mit einer kleinen Schere die freigelegten knöchernen Bögen durch.

Zu gleicher Zeit also die knöchernen und die häutigen. Wo ein Blutsinus im Wege war, wurde dieser auch durchtrennt. In diesen Fällen bekam er aber eine Blutung, die sicherlich häufig unstillbar gewesen sein wird und selbst, wenn die Stillung gelang, einen großen Blutverlust darstellte. Das Blut ergoß sich in die Lufträume des ganzen Schädels. Nur wenn er den knöchernen Bogen öffnen wollte, ohne ihn zu durchschneiden, hat er den Sinus geschont. Dies wird denn auch von ihm besonders hervorgehoben (25) p. 448: „A cet effet, les canaux semi-circulaires étant mis à nu sur un pigeon, j'ouvris l'un de ces canaux, l'horizontal, par le côté opposé à celui qu'occupe l'artère et sans ouvrir l'artère par conséquent."

Weder hat Flourens den häutigen Kanal in situ nach Eröffnung des knöchernen durchschnitten noch hat er den häutigen Kanal hervorgezogen, um ihn außerhalb der knöchernen zu durchtrennen. Daß der häutige Kanal der physiologisch wichtige Bestandteil ist, glaubt er besonders feststellen zu müssen. Es geht dies aus dem gleich folgenden Zitat hervor. Nachdem er nämlich nach der Freilegung und Eröffnung des knöchernen Kanals keine Störungen gesehen hat, geht er, um zu reizen, mit dem Ende einer Nadel in den eröffneten knöchernen Kanal ein, beobachtet heftige Bewegungen und sagt daraufhin (25): „C'est donc dans les parties des canaux semi-circulaires contenues dans les canaux osseux parties qui, comme l'ont montré les recherches de Comparetti, de Scarpa, de M. Cuvier, constituent les véritables canaux semi-circulaires etc."

Flourens kombinierte auch schon die Durchtrennung verschiedener Kanäle. Aber gerade die wichtigste Kombination, die eines Posteriors mit einem Anterior, hat er niemals ausgeführt. Wenn er daher — und zwar als erster — von den Beziehungen zwischen der Kanalebene und der auftretenden Bewegungsstörung spricht, so denkt er an eine Übereinstimmung oder Analogie zwischen der anatomischen Anordnung der Kanäle und der Art der Bewegungsstörungen nur in der Weise, daß sowohl in der Lage der Kanäle wie auch in den Richtungen der anormalen Bewegungen die drei Dimensionen des Raumes einzeln zum Ausdruck kämen. Die beiden Posterior-Anterior-Ebenen kennt er als physiologische Hauptebenen nicht und auch nicht die Bewegungen in diesen Ebenen. Er sagt (25) p. 481: „et c'est une chose digne de remarque sans doute, qu'il y ait précisément autant de directions différentes de ces mouvements qu'il y a de directions principales ou cardinales de tout mouvement: d'avant en arrière et d'arrière en avant; de haut en bas et de bas en haut; de droite à gauche et de gauche à droite."

Die Methode, die in derselben Ebene liegenden Kanäle (Posterior-Anterior) gleichzeitig zu durchschneiden, um zu beweisen, daß die Bewegungen in der Ebene der Kanäle erfolgen, rührt von Breuer her.

Goltz (30) benutzte ein sehr primitives Operationsverfahren. Er durchschnitt die Haut oberhalb der Labyrinthgegend, schob sie zur Seite und indem er dann mit einem kleinen Hohlmeißel durch Muskel- und Schädeldecke einfach hindurchging, zerstörte er von den blutüberschwemmten Bogengängen — man kann sagen auf gut Glück — was ihm in den Weg kam. Er kratzte also gewissermaßen die Bögen teilweise aus und wird wohl meist das große Kreuz fortgeräumt haben. Methodologisch bedeutet dieses Verfahren einen großen Rückschritt Flourens gegenüber. Um so mehr müssen

wir den kritischen Verstand bewundern, der es Goltz ermöglichte, das Eigentümliche der auftretenden Störungen so scharf zu erfassen, das Zufällige von dem Gesetzmäßigen so streng zu trennen, daß es ihm glückte, auf diese Weise allein durch eine kritische Analyse seiner Versuche zur Entdeckung des sechsten Sinnes zu gelangen.

II. Periode.

Angeregt durch die Goltz'sche Arbeit haben sich eine erstaunlich große Anzahl von Forschern der Ergründung der nicht-akustischen Labyrinthfunktionen zugewandt. Die einen versuchten die Operationstechnik unter Benutzung aller möglichen Hilfsmittel zu verbessern, die anderen durch Heranziehung von möglichst verschiedenen Tierarten zu den Versuchen die Resultate zu verallgemeinern und zu stützen.

Als besonders geeignet zu den Operationen hat sich die Taube erwiesen, und bei ihr ist denn auch die Methodik am weitesten ausgebildet worden. Die Taube steht in der Tierreihe so hoch, daß man leicht Rückschlüsse auf die Säuger und speziell den Menschen machen kann, und dabei lassen die anatomischen Verhältnisse des Labyrinths nicht nur ganz zuverlässige Totalexstirpationen desselben zu, sondern gestatten auch, einzelne Teile des Organs mit jeder wünschenswerten Sicherheit und Genauigkeit zu entfernen oder zu reizen. Daher sollen hier auch die Operationen an der Taube in einem späteren Abschnitt gesondert besprochen werden.

A. Operationen an Evertebraten und Fischen.

Die Evertebraten haben so verschiedene als Ohr angesprochene Organe, und diese sitzen an so verschiedenen Körperstellen, daß sich nur einige ganz allgemeine Anweisungen für die Operationen an diesen Tieren geben lassen. Glücklicherweise sind die Statolithen und Statocysten meist leicht zugänglich. Auch handelt es sich immer nur um einfache Durchschneidungen von Nerven oder um die Fortnahme des ganzen Endorgans. Das Haupterfordernis für den guten Ausfall der Operationen besteht darin, daß man gut sehen kann, was man macht. Beides erreicht man durch eine gut eingerichtete Doppellupe, von der unten ausführlich zu sprechen ist. Wenn irgend möglich fixiere man die Tiere in einem geeigneten Halter. Für manche Tiere sind spezielle Halter angegeben worden. So für die Cephalopoden von Uexküll (65). Eine recht gute Methode, die ich häufig bei ähnlichen Versuchen angewendet habe, besteht darin, das ganze Tier in einen Gazebeutel zu bringen und diesen so knapp zuzubinden, daß das Tier durch ihn festgehalten wird. Man schneidet dann über der Stelle, wo man zu operieren wünscht, ein Loch in den Sack. Die Wassertiere operiert man unter Wasser, oder auch außerhalb des Wassers und kann dann künstliche Wasseratmung anwenden, wo dies erforderlich ist. Den Inhalt der Statocysten kann man mit einem Exkavator[1]) auskratzen oder durch einen Wasserstrahl fortspritzen. Operiert man unter Wasser, so führt auch das Ab-

1) Vgl. die Abbildung Fig. 2. A. und nähere Angaben bei (22) S. 70.

saugen durch eine Pipette gut zum Ziel und ist der Benutzung des Wasserstrahls vorzuziehen, wenn man gleichzeitig mit der Prozedur die Statocyste gut sehen will. Man saugt durch einen Gummischlauch, mit dem Munde, und wenn es sich um größere Wassermengen handelt, die angesogen werden müssen, so schaltet man, um kein Wasser in den Mund zu bekommen, noch eine Glasflasche ein.

Manche Autoren haben in der Befürchtung, es könnten von der Wunde (Operationsstelle) Reizerscheinungen ausgelöst werden, mit Cocain getränkte Wattebäuschchen in die Statocyste gelegt. Es scheint dies auch eine gute Methode zu sein, doch muß man bei der Beurteilung der Wirkung von Giften auf niedere Tiere bekanntlich sehr vorsichtig sein.

Die speziellen Vorschriften, die die Autoren für ihre Operationen an den Evertebraten angeben, hier zu wiederholen erscheint überflüssig. In der Literaturübersicht sind die Arbeiten angeführt, welche uns in bezug auf die Methodik, die naturgemäß bei allen eine sehr kleine Rolle spielt, bemerkenswert erschienen sind.

Besonders erwähnen müssen wir aber die interessanten und lehrreichen Versuche mit eisernen Statolithen. Kreidl (36) hat die natürlichen Statolithen durch eiserne ersetzt und diese dann mit einem Elektromagnet in Bewegung gebracht. Die geistreiche Idee rührt von Exner her, die wiederum auf einer Beobachtung von Hensen fußt. Letzterer hat nämlich gesehen, daß gewisse Krebse bei der Häutung die Statolithen verlieren und nach derselben wieder frisch bilden, und zwar aus dem Material, das dem Tiere gerade zur Verfügung steht. Kreidl hat diese wichtigen Versuche mit geschickter Überwindung aller Schwierigkeiten zu einem sehr schönen Abschluß gebracht. Er ließ Palaemon xiphias und squilla in besonderen Wasserbehältern sich häuten und brachte die eben gehäuteten und statolithenlosen Tiere dann in eine Schale mit filtriertem Wasser, auf deren Boden sich eine Lage von ferrum oxyd. hydrog. reduct. befand. Die Tiere führten sich dann das Eisen in die Statocysten ein.

B. Operationen an Fröschen.

Der Frosch ist für die Erforschung der nicht-akustischen Funktionen des Labyrinths von großer Wichtigkeit und wird in dieser Beziehung nur von der Taube übertroffen. Bei ihm ist daher auch das Operationsverfahren besonders gut ausgebildet worden. Wir wollen es hier recht ausführlich beschreiben, um so mehr, da es in jedem praktisch-physiologischen Kurs zur Anwendung kommen sollte. Ausgerüstet mit den nötigen Instrumenten und Vorschriften muß jeder Student die Fortnahme der Labyrinthe am Frosch gut ausführen können, auch ohne daß man gezwungen ist, jedem einzelnen die Operation vorher zu zeigen.

Man kann für die allgemeinen Zwecke nur die Fortnahme von der Mundhöhle aus empfehlen. Schrader (55) hat sie zuerst ausgeführt, das Verfahren aber nicht weiter ausgebildet. Da die vertikalen Bögen nach oben liegen und der horizontale ziemlich weit nach außen, so kann man von unten her bequem die Ohrhöhle anbohren, ohne einen Bogen zu verletzen. An dem in toto herausgezogenen Labyrinth braucht kein Teil zu fehlen

und man kann sich daher leicht von der Vollständigkeit der Operation durch Betrachtung des Labyrinths überzeugen. Von der Mundhöhle aus ist es ferner leicht, jeden Blutverlust zu vermeiden. Man muß schon recht ungeschickt sein, um die Äste der Carotis, die eigentlich gar nicht im Wege liegen, zu verletzen. Hingegen gehört schon eine größere Geschicklichkeit dazu, um vom Rücken aus blutlos bis zum Labyrinth vorzudringen. Endlich ist zu berücksichtigen, daß man vom Rücken her durch eine nicht unbedeutende Muskelschicht hindurch muß, was zwei Nachteile mit sich bringt: erstens operiert man in größerer Tiefe und zweitens ist man nicht sicher, ob nicht gewisse nach der Fortnahme des Labyrinths sich einstellende Symptome, wie z. B. das Schiefhalten des Kopfes, von der Verletzung eben dieser Muskeln herrühren.

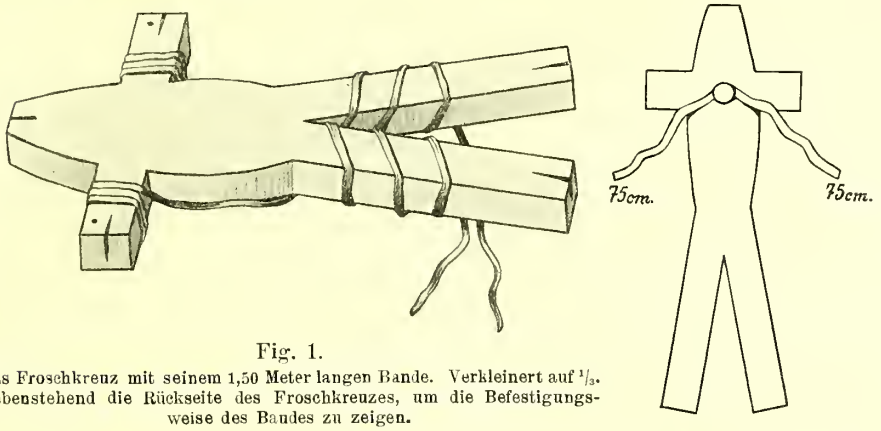


Fig. 1.
Das Froschkreuz mit seinem 1,50 Meter langen Bande. Verkleinert auf $^1/_3$. Nebenstehend die Rückseite des Froschkreuzes, um die Befestigungsweise des Bandes zu zeigen.

Wir haben also allen Grund, die Operation vom Munde her als die bessere und zugleich leichtere vorzuziehen. Als Versuchstier eignet sich am besten die weibliche Esculenta. Da bei ihr der Knochen (das Parabasale), welcher das Labyrinth bedeckt, dünner ist als bei den männlichen Tieren, so sieht man das Otolithensäckchen besser durchscheinen. Indessen ist der Unterschied nicht sehr groß, und da man die Stelle, wo man den Knochen anzubohren hat, auch sonst leicht findet, so sind die männlichen Tiere nicht wesentlich schwerer zu operieren. Auch zwischen rana esculenta und rana temporaria ist der Unterschied ein nur sehr geringer und beruht nur darauf, daß der etwas längere Kopf der Esculenta die Operation in geringem Maße erleichtert.

1. Die Operation von der Mundhöhle aus.

Der Frosch wird in Rückenlage auf einem Froschkreuz (Fig. 1) befestigt. Genaueres über das Froschkreuz soll andern Orts angegeben werden. Hier sei nur bemerkt, daß sich an seinem Kopfende und an den beiden Fußenden Einschnitte befinden, in die man einen dünnen Bindfaden einklemmen kann. Man hat nun einen kleinen Haken (Fig. 2 c.), an dem sich ein kurzer Bindfaden befindet, und einen zweiten gleichen Haken, an den ein etwas längerer Bindfaden geknüpft ist. Der Haken mit dem kürzeren Bindfaden wird in den Rand des Oberkiefers eingehakt und in dem Schnitt am Kopf-

ende des Kreuzes festgeklemmt. Man fixiert dadurch den Kopf. Der Haken mit dem längeren Bindfaden wird in den Rand des Unterkiefers eingehakt. Indem man an diesem Bindfaden zieht, öffnet man den Mund des Frosches, bis der Unterkiefer auf die Brustwand zu liegen kommt, und klemmt dann den Bindfaden in den Schnitt an einem der Fußenden des Froschkreuzes fest. Auf diese Weise ist also der Frosch mit weit geöffnetem Munde sehr gut fixiert.

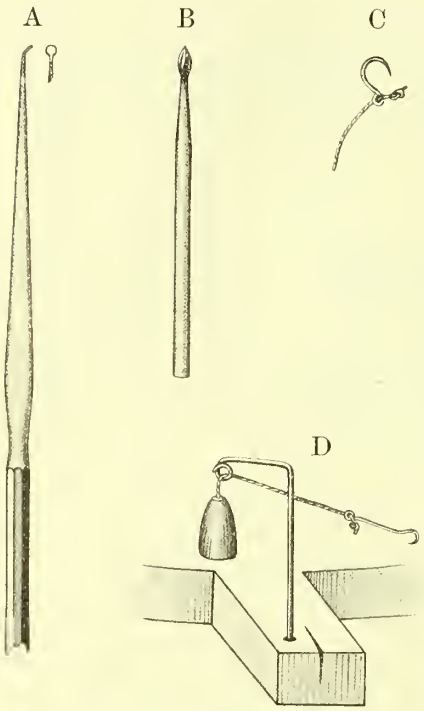


Fig. 2.

A. Exkavator; B. Bohrer (Knospenform); C. Häkchen um den Ober- und Unterkiefer des Frosches anzuseilen (vergrößert); D. Methode um mit Hilfe eines Galgens, der in das Froschkreuz eingesetzt wird, Schleimhaut und Blutgefäße zur Seite zu ziehen.

Nun schneidet man mit einer kleinen Schere die Schleimhaut des Oberkiefers genau in der Medianlinie auf, und zwar fast in der ganzen erreichbaren Ausdehnung. Der Schnitt reicht also etwa nach vorne bis zum vorderen Rande der Augäpfel und nach hinten bis zu der Verschlußstelle des Oesophagus. Um ein erstes Loch in die Schleimhaut zu machen, in das man dann mit der Scherenspitze eindringt, hebt man mit der Pinzette eine kleine Querfalte empor, die man dann quer durchschneidet.

Wir wollen annehmen, daß man nun zunächst das rechte Labyrinth des Frosches zu entfernen wünscht, also dasjenige, welches für uns, die wir den Frosch so vor uns legen, daß seine Beine zu uns gerichtet sind, jetzt links liegt. Wir erfassen mit der Pinzette die linke Hälfte der durchschnittenen Schleimhaut etwa in der Hälfte des Schnitts und schlagen sie nach außen um. Man sieht dann ein kleines Büschel von Blutgefäßen, Äste der Carotis interna, welches aus der Tiefe (aus der fossa condyloidea des os occipitale laterale) hervortritt und an der aufgehobenen Schleimhaut haftet. Es gilt, diese Blutgefäße, ohne sie zu verletzen, von dem Operationsgebiet abzuziehen. Wir bedienen uns hierzu eines kleinen Hakens (Fig. 2, D), der einen etwas längeren geraden Teil hat, so daß wir ihn bequem zwischen die Finger nehmen und die Blutgefäße unter das kleine Häkchen bringen können. Am Ende des Hakens ist wieder ein dünner Bindfaden befestigt, den wir aber nicht am Froschkreuz selbst einklemmen können, da wir den Haken in der Richtung nach schräg oben anziehen müssen. An dem Armende des Froschkreuzes ist ein Loch gebohrt, und in dieses wird ein kleiner Galgen aus Messingdraht eingesteckt (Fig. 2, D). Er sitzt hier durch sanfte Reibung fest. Am Ende des Galgens ist der Draht zu einem kurzen Stück Spirale aufgewunden ($1^1/_2$ Windung), und diese Windungen haben so viel Abstand voneinander, daß

man den Bindfaden des Hakens zwischen ihnen durchziehen kann. Der Faden ist dann wie durch einen Ring gezogen, aus dem er nicht von selbst herausrutschen kann, und da am Ende des Bindfadens ein kleines Bleigewicht befestigt ist, welches frei in der Luft schwebt, so werden die Blutgefäße nach außen und oben in sanfter Weise angezogen.

Die Eröffnung der Ohrhöhle geschieht in folgender Weise. Das Os parabasale bildet ein Kreuz mit einem langen Schenkel nach vorne, einem ganz kurzen nach hinten und zwei wieder etwas längeren nach den Seiten. (Fig. 3). Durch diese Seitenschenkel hindurch sieht man das Otolithensäckchen hindurchschimmern. Man bohrt mit einem feinen Bohrer mitten in dieses hinein[1]). Es hat dies erste Anbohren den Zweck, für den größeren Bohrer, welcher nicht sehr spitz sein soll (Fig. 2, B), einen Anhaltspunkt zu geben. Natürlich kann man auch mit irgend einer Nadel dieses erste Loch bewerkstelligen. Es ist aber ein kleiner Bohrer (0,7 mm, sogenannter Foret)[2]) vorzuziehen, weil er am vorderen Ende breiter ist und daher, wenn man durch die Wand der Ohrhöhle hindurch ist, sofort in die Tiefe der Höhle widerstandslos einsinkt. Man fühlt also gleich, daß man sich am richtigen Ort befindet. Nachdem dieses kleine Loch gemacht ist, wird der bereits erwähnte größere Bohrer[3]) benutzt, um die Ohrhöhle so weit zu öffnen, daß der Bohrer durch das Loch hindurch einsinken kann. Nur wenn der Bohrer nicht genügend scharf war, bleibt eine kleine dünne Knorpelplatte am Rande der Bohröffnung hängen. Da sie den Einblick in die Oberhöhle erschwert, entfernt man sie mit einer spitzen Pinzette.

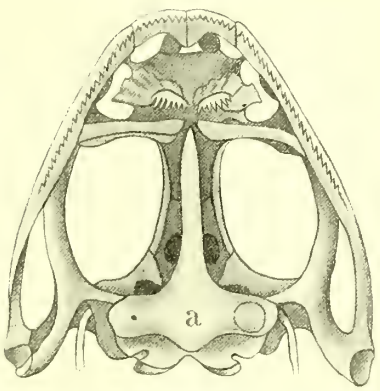


Fig. 3.
Der Froschschädel von unten gesehen. In das os parabasale ist links das kleine Loch eingezeichnet, welches mit dem kleinen Metallbohrer gemacht wird. Rechts ist das Loch angedeutet, zu dem das kleine Loch mit dem größeren Bohrer erweitert wird. (Die Abbildung teilweise nach Gaupp.)

Es bleibt übrig, das Labyrinth herauszuziehen. Durch wenige Stiche mit einer Nadel oder dem kleinen Bohrer bringt man den Inhalt des Otolithensäckchens zum Ausfließen und spült ihn mit einer Spritzflasche, oder auch nur indem man aus einiger Höhe das aus einem Schwämmchen gedrückte Wasser auf die Öffnung der Ohrhöhle herunterfallen läßt, nach außen fort. Mit ganz kleinen Schwämmchen, nicht viel größer als ein Stecknadelknopf, tupft man dann die Ohrhöhle aus. Hierbei hält man die Schwämmchen mit einer spitzen Pinzette fest und drückt sie ganz in die Ohrhöhle hinein. Dann geht man mit dem Exka-

1) In seltenen Fällen ist der Knochen so dick oder das Otolithensäckchen so klein und tief liegend, daß man es nicht durchschimmern sieht. Man findet aber auch ohne diesen Anhaltspunkt leicht die richtige Stelle, wenn man sie von anderen Fröschen her kennt.

2) Abgebildet in meinen „Untersuchungen“ (22) Fig. 37 S. 125.

3) Dieser in Fig. 2, B. abgebildete Bohrer gehört zu den zahnärztlichen Instrumenten. (Erhältlich bei Ash and Sons als Bohrer für die Cavität, Knospenform Nr. 69.) Die Bohrer sind geschärft und ungeschärft käuflich. Nur die geschärften sind brauchbar. Der Durchmesser an der dicksten Stelle beträgt 2,0 mm.

vator (Fig. 2, A) [1]) in die Ohrhöhle ein und kratzt gewissermaßen den ganzen Inhalt zusammen. Zu diesem Zweck fängt man in der Mitte der der Öffnung gegenüber liegenden Wand (dorsale Decke der Ohrhöhle) an und führt das scharfe Ende des Exkavators von diesem Pol aus — die Ohrhöhle als Hohlkugel gedacht — über einen halben Meridian bis zur oberen Öffnung. Dabei bleibt man, ohne stark zu drücken, stets mit der knöchernen Wand in Berührung und vermeidet es dadurch, einen Bogengang zu überspringen. Hat man die kratzende Bewegung auf einem solchen halben Meridian vollendet, so fängt man, ohne den Exkavator aus der Ohrhöhle herauszuziehen, wieder von dem ersten Ausgangspunkt an und bestreicht einen zweiten, neben dem ersten befindlichen halben Meridian. Man kommt durch etwa achtmaliges Wiederholen dieser Prozedur rings im Kreise herum, wodurch der ganze Inhalt der Ohrhöhle von der Wand entfernt wird. Nun versucht man mit dem Exkavator den gelockerten Inhalt aus der Ohrhöhle herauszuholen. Es kommt dann ein kleines dunkelgefärbtes Klümpchen zum Vorschein, welches, wenn es nicht schon am Exkavator hängen bleibt, mit der spitzen Pinzette gepackt und aus der Ohrhöhle herausgezogen wird. In ein Uhrschälchen unter Wasser gebracht und auf eine schwarze Unterlage gestellt, erkennt man das vollständige Labyrinth mit seinen 3 Bogengängen und kann sich, wenn man die kleinen anhaftenden Gewebsfetzchen mit Nadel und Pinzette entfernt, leicht von der Vollständigkeit der Bögen und Ampullen überzeugen.

Es gibt eigentlich nur zwei Weisen, wie die Bögen bei der beschriebenen Prozedur zerreißen. Entweder wird jeder einzelne Bogen an seinem einen Ende von dem Utriculus abgerissen, und dann sehen wir die Bögen als drei nicht ganz gleich lange Fäden im Wasser flottieren, oder aber man sieht nur zwei solche Fäden, einen langen und einen kurzen. Der lange besteht dann aber aus zwei Bögen (Anterior und Posterior), welche durch den sinus utriculi, der vom Utriculus abgerissen ist, zusammenhängen. Da jeder Bogengang durch einen knöchernen Ring hindurch geht, so ist im letzteren Falle der eine von den beiden zusammenhängenden Bögen durch den knöchernen Kanal des anderen mit hindurchgezogen worden. In Glyzerin gebracht, nehmen die Bögen ihre ursprüngliche Form infolge ihrer Elastizität wieder an, und man kann die ganze Konfiguration des Gebildes, ihre Lage in den 3 Ebenen und das Vorhandensein der Ampullen sehr schön erkennen, besonders wenn man das Präparat vorher kurze Zeit in Karminlösung gebracht hat.

Bei einiger Geschicklichkeit und einiger Übung gelingt es fast immer, das ganze Labyrinth im Zusammenhang auf diese Weise aus der Ohrhöhle zu entfernen.

Sollte indessen ein Teil zurückgeblieben sein, so muß man noch einmal mit dem Exkavator eingehen, und man erinnere sich dann daran, daß die Form der Ohrhöhle nicht unbedeutend von der Hohlkugel abweicht. Sie buchtet nach hinten und medianwärts von dem Bohrloch ziemlich weit aus, und an dieser medianen Wand befindet sich auch die Eintrittsstelle des Nervus VIII. Hier pflegt der zurückgebliebene Rest noch fest am Nerven zu haften.

---

1) Nr. 112 von Ash and Sons. Die abgebogene kleine Fläche hat einen Durchmesser von 0,7 mm.

Hat man sich überzeugt, daß alle Bögen und Ampullen entfernt worden sind, so stopft man noch einen der kleinen oben erwähnten Schwämme in die Ohrhöhle und wischt diese, rings herum fahrend, sauber aus. Dann wird die durchschnittene Schleimhaut wieder in ihre Lage gebracht, und die Operation kann in der ganz gleichen Weise auf der anderen Seite ausgeführt werden, wobei man dann nur nötig hat, den obenerwähnten Drahtgalgen in das andere Armende des Froschkreuzes einzustecken. Die aufgeschnittene Schleimhaut legt sich nach Beendigung der Operationen so gut aneinander, daß ein Vernähen derselben nicht nötig ist. Will man aber die Frösche lange am Leben erhalten, so empfiehlt es sich doch, durch zwei Nadeln die Wundränder zu vereinigen.

2. Die Operation vom Rücken aus.

Wir haben oben auseinandergesetzt, wie große Vorteile es mit sich bringt, wenn man von der Mundhöhle aus die Labyrinthe entfernt; aber es gibt Fälle, in denen man gezwungen ist, vom Rücken aus zu operieren, nämlich dann, wenn man ohne Verletzung des übrigen Labyrinths einen oder mehrere Bögen durchtrennen will. Man durchtrennt dann nur den Knochen an der Stelle, wo der häutige Kanal durch denselben hindurchgeht, und kann dies bei allen drei Bogengängen ohne eigentliche Eröffnung der Ohrhöhle ausführen.

Der Frosch wird in Bauchlage auf dem Froschkreuz befestigt, die Spitze des Oberkiefers in der obenerwähnten Weise mit dem Häkchen und dem Bindfaden am Kopfende des Froschkreuzes fixiert. Um die Stelle zu finden, wo sich in der Tiefe die Ohrhöhle befindet, denke man sich hinter den beiden Augen an diese angrenzend noch ein zweites Augenpaar vorhanden, von derselben Größe, aber etwas dichter aneinander stehend. Unter der Mitte dieser gedachten Augen — fast genau in der Verbindungslinie der beiden Mittelpunkte der Trommelfelle — befindet sich die Mitte des os prooticum, an dessen Rändern die drei knöchernen Kanäle liegen.

Um sich den genügenden Platz zum Operieren zu verschaffen, muß man einen langen Hautschnitt machen, der in der Medianlinie vom vorderen Rande der Augen bis etwa zur Mitte der Wirbelsäule (4. oder 5. Wirbel) reicht. Der Schnitt ist der gleiche für die Operationen auf beiden Seiten. Die Haut wird mit kleinen Häkchen angeseilt und mit Hilfe der Einschnitte im Froschkreuz auseinandergehalten. Ein oberflächlich auf dem Muskel liegendes Blutgefäß wird oberhalb und unterhalb des Operationsfeldes mit dem Galvanokauter[1]) verödet. Dann schiebt man die Muskeln (rhomboideus ant. u. temporalis), die man an ihrer Ansatzstelle am Schädel durchtrennt, mit der Messerspitze nach hinten und legt auf diese Weise das Os prooticum in seinem ganzen Umfange frei. Die Wunde darf nicht bluten, und etwaige kleine Blutaustritte müssen galvanokaustisch zum Stillstand gebracht werden. Es ist angegeben worden, daß man die Lage der drei Kanäle von außen sehen könne. Bei den von mir operierten Fröschen war dies nicht der Fall. Selbst durch die Kanäle gezogene schwarze Schweinsborsten habe ich nicht durchschimmern sehen. Auch gab sich die Lage der

1) Vgl. meine „Untersuchungen“ (22) S. 66.

Kanäle nicht durch eine Hervortreibung des Knochens zu erkennen. Aber die Kanäle sind trotzdem nicht schwer zu finden. Der äußere horizontal verlaufende befindet sich nicht weit von der knorpeligen Grenze, wo os prooticum und os tympanicum zusammenstoßen. Die beiden vertikalen Kanäle bilden mit der Medianlinie des Tieres Winkel von 45°. Die medianwärts gelegenen Grenzen des os prootieum mit dem frontoparietale und dem occipitale laterale (Fig. 4a, b u. c) bilden etwa die gleichen Winkel mit der Mittellinie, und so liegen die beiden Kanäle, wenn man von oben auf das Tier sieht, dicht an diesen beiden Grenzen des Knochens und verlaufen parallel mit diesen. Will man nun die Kanäle durchtrennen, so verfährt man am besten folgendermaßen: in die zahnärztliche Bohrmaschine (Whitesche Bohrmaschine) wird eine kleine Kreissägc eingesetzt und mit dieser der knöcherne Kanal quer durchschnitten, ohne jedoch so tief zu gehen, daß man die Ohrhöhle eröffnet. Die Kreissäge hat einen Durchmesser von nur 1,8 mm und eine Dicke von 0,8 mm[1]). Der Schnitt, den man auf diese Weise ausführt, ist also verhältnismäßig breit, man kann unter der Westienschen Lupe beide Öffnungen des durchschnittenen Kanals sehen. Auch sieht man den Boden des Schnittes, der die Ohrhöhle deckt. Ist man vorsichtig mit der kleinen Scheibe in die Tiefe gedrungen, so bleibt der häutige Kanal zunächst unverletzt, und man kann ihn mit einem Häkchen hervorzichen oder mit einem dünnen Messer in situ durchschneiden.

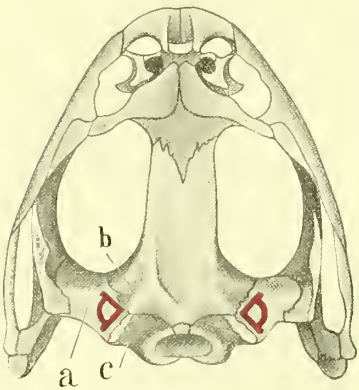


Fig. 4.

Der Froschschädel von oben gesehen. Die Lage der 3 Bögen ist eingezeichnet. a ist das os prooticum, b das os fronto-parietale, c das os occipitale laterale. (Die Abbildung teilweise nach Gaupp.)

Nach der Operation wird der Muskel wieder in seine normale Lage zurückgebracht und die Haut vernäht.

Beim Frosch kann man auch allein die Otolithenfunktion ansschalten. Man legt von der Mundhöhle aus ähnlich wie bei den oben beschriebenen Labyrinthoperationen das Otholithensäckchen frei. Schimmert es nicht durch den Knochen hindurch, so wird dieser vorher mit einem kleinen scharfen Löffel dünn geschabt. Zuerst macht man ein kleines Loch mit einem Metallbohrer, doch hört man auf zu bohren, sobald die Spitze des Bohrers durch den Knochen gedrungen ist und etwas Perilymphe hervorfließt. Die feine Öffnung wird mit dem knospenförmigen Bohrer etwas erweitert. Nach Entfernung der angrenzenden Knochenränder, wozu man am besten meine Horizontalzange benutzt, liegt dann das Säckchen frei. Es wird mit einer feinen Pinzette eröffnet und die Otolithenmasse vollständig entfernt; wenn nötig mit Hilfe eines feinen Wasserstrahls. Ach (1), Laudenbach (40).

---

1) Man verschafft sich am einfachsten eine solche Kreissäge, wenn man den oben erwähnten Bohrer (Fig. 2. B) vom Mechaniker abdrehen läßt. Es braucht nur der knospenförmige Teil des Bohrers derart von zwei Seiten abgedreht zu werden, daß eine kleine Kreissäge übrigbleibt.

C. Operationen an Tauben.

Die Taube ist das klassische Tier für die Labyrinthoperationen. Ihre knöchernen Bogengänge und Ampullen liegen fast wie frei präpariert in der Ohrhöhle, nur durch feine, kleine Knochenbälkchen untereinander und mit den Wänden der Höhle verbunden. Bei der Taube teilt sich der Nervus VIII in 5 Äste, welche einzeln in die Ohrhöhle eindringen, um sich zu den verschiedenen Teilen des Labyrinths zu begeben. Hier ist auch schon eine ausgebildete Schnecke vorhanden wie bei den Säugern, ohne daß die bei diesen Tieren vorhandenen Schwierigkeiten, die sich ihrer Entfernung entgegenstellen, zu überwinden wären. Daher sind denn auch gerade an der Taube zahllose Operationen ausgeführt worden, und die Methodik hat sich immer mehr und mehr verfeinert. Man kann sagen, daß es sich hier um die feinsten Operationen handelt, die überhaupt gemacht werden können. In meinen Untersuchungen über das Endorgan des Nervus VIII (22) habe ich die Methodik sehr ausführlich beschrieben. Seitdem sind von meinen Schülern und von andern Forschern die Versuche an Tauben nach meinen Vorschriften vielfach wiederholt worden. Die Methodik hat sich stets bewährt, und ich kann heute weder viel hinzufügen, noch auch von den gegebenen Vorschriften viel fortlassen. Ich betone dies besonders, da für denjenigen, der nicht aus Erfahrung weiß, mit welcher Präzision bei diesen Operationen vorgegangen werden kann und muß, die Beschreibung der zahlreichen Instrumente und der einzelnen Vornahmen bei der Operation leicht den Eindruck einer übertriebenen und unnötigen Genauigkeit machen könnte. Zwei Autoren — die einzigen, soviel ich weiß — haben denn auch geglaubt, sich über meine Vorschriften hinwegsetzen zu können, und es ist charakteristisch, daß gerade diese offenbar sehr minderwertige Operationen gemacht haben. Um nicht hier alles zu wiederholen, was ich schon früher gesagt habe, gebe ich hier die Methodik in etwas größeren Zügen und verweise den Leser auf die oben angegebenen „Untersuchungen“. Ich füge einiges hinzu, was die Erfahrungen seitdem gelehrt haben, und lasse fort, was sich auf Untersuchungen bezog, die kein allgemeineres Interesse haben dürften.

Die Taube kommt in den Taubenhalter. Derselbe ist für gute Operationen unumgänglich notwendig. Der Ring, der über den Hals der Taube geschoben wird, und in den dann auch noch der Schnabel des Tieres kommt, ist etwas vereinfacht worden. Er öffnet sich durch ein Scharnier und nicht mehr in der früher angegebenen komplizierten Weise. Wenn die Tauben große Nasenwarzen haben, so kommt es vor, daß sie schwer atmen können, weil der Ring auf die Warzen drückt. In diesem Fall kann man über den Unterschnabel einen dickwandigen Gummiring ziehen (kleines Stück eines Gummischlauches), der dann den Schnabel offen hält.

Die stereoskopische Lupe.

Es haben sich eine ganze Anzahl von stereoskopischen Lupen eingebürgert. Für unsere Zwecke ist es sehr wichtig, den Platz unterhalb der Lupe vollkommen frei zu haben. Man treffe daher die Einrichtung, daß die Lupe auf einer eisernen Stange oberhalb des Operationstisches leicht verschiebbar befestigt ist (vergl. die Abbildung in (22)). Eine Marke auf der

Stange zeigt an, wohin die Lupe zu schieben ist, damit sie sich der ebenfalls auf dem Tisch befestigten Lampe gerade gegenüber befindet. Dann fällt das Licht, welches von dem unten an der Lupe befestigten Spiegel reflektiert wird, durch die unmittelbar auf dem Spiegel aufliegende Linse konzentriert, genau auf das Operationsfeld. Da dieses Licht natürlich nicht genau in der Blickrichtung einfällt, so kann es auch nicht den Boden von tieferen engen Räumen, in die man hineinzuschen wünscht, beleuchten. Das ist aber zuweilen ein Bedürfnis, und für diesen Zweck habe ich neuerdings noch eine kleine, leicht einsetzbare und leicht abnehmbare Beleuchtungsvorrichtung angebracht. Sie sei kurz beschrieben:

An der der Leuchtquelle zugewandten Seite der Lupe wird ein Messingbügel eingehängt, der an seinem Ende eine Konvexlinse von 5 cm Durchmesser und 14 D. trägt (Fig. 5 L.). An dem Bügel befindet sich noch ein dünnerer Bügel, an dessen Ende eine dünne Glasplatte (25 mm breit, 35 mm lang) schräg nach unten angebracht ist (Fig. 5. G.). Das Licht einer Lampe, die etwa 50 cm über dem Operationstisch sich befindet, wird durch die Sammellinse konzentriert und von der Glasscheibe auf das Operationsfeld geworfen. Durch diese Glasscheibe sieht man aber auch hindurch, und so fällt das Licht genau in der Richtung in die Wunde, in die man selbst hineinblickt. Bekanntlich hat Helmholtz diese Methode bei seinem Augenspiegel verwendet und, um möglichst viel Licht reflektieren zu lassen, mehrere Glasplatten übereinander gelegt. Da wir die Lichtquelle leicht sehr stark wählen können und es durch die Sammellinse konzentrieren, so genügt uns eine einzige Glasplatte. Dieser Beleuchtungsapparat ist aber insofern unbequem, als man leicht mit den Instrumenten beim Operieren an ihn stößt. Man wird ihn daher nur benutzen, wenn er besonders nötig ist.

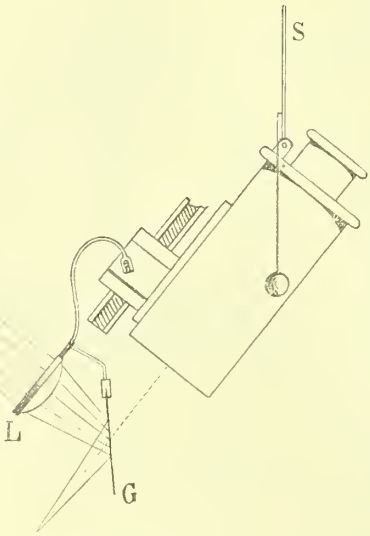


Fig. 5.

Die Westiensche Lupe mit der einhängbaren Vorrichtung zur zentralen Tiefenbeleuchtung. L ist die Linse, G die als Spiegel dienende dünne Glasscheibe, S der bewegliche Schirm mit seinem kugelförmigen Gegengewicht, der die Augen beschattet.

Aber auch beim gewöhnlichen Operieren kann man die Beleuchtungsverhältnisse noch wesentlich besser gestalten, als dies ursprünglich bei Benutzung nur eines Spiegels möglich war. Ich habe noch rechts und links an der Lupe je einen abnehmbaren Bügel angebracht. Jeder trägt einen Spiegel mit aufgelegter Konvexlinse, wie sich ein solcher schon an der Lupe befindet. Sie werfen das Licht von vorne und seitlich her auf das Operationsfeld, und so wird dieses dann von 3 Seiten aus beleuchtet. Auch hier stört der rechte Spiegel häufig die freie Bewegung der Instrumente und wird nur angeschraubt, wenn ein besonderes Lichtbedürfnis vorhanden ist. Den linken

lasse ich aber beständig an der Lupe und bin mit seiner Wirkungsweise sehr zufrieden.

Der Galvanokauter mit Fußkontakt sollte bei jeder Operation gebrauchsbereit sein. Auch wenn es sich nicht darum handelt, einen Sinus zu veröden, ist er zur Stillung der hier und da vorkommenden kleinen Blutungen aus der Haut, den Muskeln oder dem spongiösen Knochengewebe sehr wertvoll. Ich speise ihn durch die elektrische Zentrale in folgender Weise. Der Strom der Zentrale geht durch ein kleines Wandbrett, auf dem eine Anzahl von Glühlampen nebeneinander in beliebiger Auswahl geschaltet werden kann. Der Strom geht dann durch den für gewöhnlich geschlossenen Quecksilberschlüssel des Fußkontaktes zur Hauptleitung zurück. Vom Quecksilberschlüssel zweigt sich als Nebenleitung die Leitungsschnur zum Galvanokauter ab. Es bildet also der Quecksilberschlüssel eine gute Nebenleitung zum Galvanokauter, und wenn ich mit dem Fuß auf das Pedal drücke, so öffne ich den Quecksilberkontakt, und der Strom geht, solange ich das Pedal herabgedrückt lasse, durch den Galvanokauter. Derselbe soll nur eben dunkelrotglühend werden, was sich leicht durch Einschaltung der richtigen Glühlampenzahl bewerkstelligen läßt.

Die Exkavatoren.

Diese Instrumente haben sich auch sonst in die physiologische Technik eingebürgert, so daß ich sie nicht besonders zu empfehlen brauche. Es sei nur darauf hingewiesen, daß sie gut scharf sein sollen, damit sie sich ohne starken Druck in den Knochen eingraben lassen. Man schärft sie wie alle die kleinen Instrumente auf einem Schmirgelholz [1]).

Von besonderer Wichtigkeit erscheinen mir noch die Horizontalzangen. Ich benutze 2 oder 3 verschiedene Größen. Sie gestatten etwas auszuführen, was mit keinem anderen Instrument leicht gelingt, nämlich von einer Knochenwand ein Stück herauszuschneiden, welche sich in der Tiefe der kleinen Wunde quer zu unserer Blickrichtung ausbreitet. Mit der kleinsten dieser Horizontalzangen muß man in das Foramen communicans zum Zwecke seiner Erweiterung eingehen können. Für größere Tiere, Meerschweinchen und Kaninchen besitze ich eine sehr viel größere Horizontalzange, die sich auch bei diesen Operationen gut bewährt hat. In bezug auf die übrigen Instrumente verweise ich auf meine Untersuchungen (22).

D. Die Entfernung des Labyrinths bei Hunden, Katzen und Kaninchen.

Das wichtigste technische Erfordernis, um das Labyrinth bei Hunden ganz zu entfernen, ist eine gute kleine elektrische Stirnlampe, mit der man viel Licht in die tiefe Höhle der Operationswunde werfen kann. Die Operation ist nur dann richtig beendet, wenn man den Stumpf des Nervus VIII inmitten einer sauberen Knochenfläche aus dem inneren Ende des meatus acust. int. hervortreten sieht. Dazu ist natürlich ein blutloses Operationsfeld und eine gute Beleuchtung nötig. Ich bin bei meinen Exstirpationen in folgender Weise vorgegangen.

1) Längeres flaches Holzstück, das mit feinem Schmirgelpapier überzogen ist. In Uhrenfurniturgeschäften erhältlich.

Der Kopf des Hundes muß fixiert werden, während er stark zur Seite gedreht und zugleich stark auf die Brust geneigt ist. Da man während der Operation die Lage des Kopfes oft, aber immer nur wenig verändern muß, so läßt man ihn am besten von einem Diener halten [1]). Mir ist kein Kopfhalter bekannt, der für diese Operation gut verwendbar wäre.

Die Ohrmuschel wird bis zum knöchernen Gehörgang gespalten und der Hautschnitt bis zur bulla ossea verlängert. Letztere wird freigelegt. Mit einer kleinen Knochenzange bricht man den äußeren Gehörgang und die Bulla auf, dann kann man die Gehörknöchelchen einzeln entfernen und sieht sogleich die fenestra rotunda. Ihre Öffnung wird erweitert, wobei man sich eines kleinen Meißels und des Hammers bedient. Sobald die Windungen der Schnecke in genügender Ausdehnung frei zutage liegen, nimmt man einen nicht zu kleinen Exkavator und kratzt gewaltsam die ganze Schnecke aus. Dadurch legt man aber auch zugleich die innere Öffnung des Meatus acust. int. frei, den man nun allseitig umkreisen kann, um dadurch jede nervöse Verbindung mit etwa zurückbleibenden Teilen des Vestibulums unmöglich zu machen. (Näheres über die Operation in meinen „Untersuchungen" (22) S. 196).

In der gleichen Weise wird die Operation an Katzen, Kaninchen und Meerschweinchen ausgeführt.

In bezug auf die teilweise Zerstörung des Labyrinths und die Durchschneidungen der Bögen an Säugern, gelten die S. 195 unter F geäußerten Bedenken, die natürlich, je höher das Tier steht, desto schwerwiegender werden. Die Operationen können infolge der Härte des Knochens und der schwer zugänglichen Lage der einzelnen Labyrinthteile nicht mit der Exaktheit ausgeführt werden, wie es bei den Tauben möglich ist und wie es die Zartheit des ganzen Mechanismus des Labyrinths erfordert. Einige, freilich wenig genügende Angaben über die Methodik findet man bei Flourens.

Die späteren Autoren haben die Methode nicht wesentlich verändert.

E. Die Durchschneidung des Nervus VIII.

Da das Labyrinth schwer zu erreichen ist und noch schwerer derart zu entfernen, daß man sicher ist, keine Reste desselben zurückgelassen zu haben, so liegt der Gedanke nahe, den Stamm des Nerv. VIII zwischen seinem Austritt aus dem Gehirn und seinem Eintritt in das Felsenbein zu durchschneiden. Es ist dies auch von vielen Autoren versucht worden. An Säugern von Claude Bernard (6), Schiff (53), Tomaszewicz (62), Bechterew (4), v. Cyon (18), Kreidl (35), Biehl (10) u. a.

Es ist aber diese Durchschneidung mit vielen Schwierigkeiten verbunden. Man muß mit dem messerartigen Instrument durch einen Teil des Gehirns hindurchgehen, um an den Nerven zu gelangen. Bei dieser Gelegenheit kommt es nicht nur zu einer Gehirnverletzung, sondern auch stets zu einer recht bedeutenden Blutung in der Tiefe des Gehirns. Das Schlimmste ist, man operiert vollständig im Dunkeln, so daß man nie sicher sein kann, den

1) In das Maul des Hundes ist ein eiserner, mit dickem Bindfaden umwickelter Knebel gebunden. In diesen Knebel können zwei Handgriffe, rechts und links, eingesteckt werden, und an diesen hält der Diener den Kopf fest.

Nerven auch wirklich ganz durchschnitten zu haben. Auch die meist nicht auszuschließende gleichzeitige Durchschneidung des Nerv. facialis oder wenigstens die Verletzung desselben kompliziert diese Methode in unangenehmer Weise.[1])

Nun kann man freilich bei den Tieren den Ausfall der Operation durch die spätere Sektion kontrolieren, aber ein sicheres Resultat ergibt in dieser Beziehung die Untersuchung an der Leiche nur in dem Falle, daß man noch einen unzerschnittenen Teil des Nerv. VIII findet, die Operation also mißglückt ist. Denn der Nerv ist sehr weich, der Knochen in der Nähe steinhart, infolge der Operation ist es zu Erweichungen, Verwachsungen und sonstigen pathologischen Veränderungen der Umgebung gekommen und da ist es recht schwer und jedenfalls recht umständlich, die Vollständigkeit der früheren Operation zu beweisen. Wenn einige Fasern nicht durchschnitten wurden, so reißen diese eben sehr leicht bei der Freilegung der betreffenden Teile durch. Hier bleibt eigentlich nur die mühselige und zeitraubende Methode der mikroskopischen Untersuchung nach Entkalkung des Knochens übrig, und selbst diese ergibt nach meinen Erfahrungen oft keine sicheren Resultate.

An Tauben erscheint die intrakranielle Durchschneidung des Nerv. VIII unausführbar. Leider, denn da sich bei diesen Tieren der Nerv in 5 Äste bereits geteilt hat, bevor er in den Knochen eintritt, so wäre hier die anatomische Anordnung für eine Durchschneidung nur bestimmter Fasern in ausgezeichneter Weise gegeben.

Bei den Fröschen gelingt es dagegen leicht, nach Eröffnung der Schädelkapsel von oben den Nerv zu sehen und zu durchschneiden. (Schiff (53, 54), Girard (29).) Er liegt neben dem Kopfmark, das man etwas zur Seite schiebt, dicht hinter dem Kleinhirn. Auch kann man die beiden Äste, den Ram. anterior und posterior, einzeln durchschneiden (Schépiloff (52)).

Auch bei den Fischen, besonders den Haien, ist die Operation nicht schwer. Aber bei allen Tieren, bei denen sie leicht gelingt, ist auch das Labyrinth vollständig und ohne Nebenverletzungen leicht zu entfernen, so daß die intrakranielle Durchschneidung des Nerv. VIII nur dann einen besonderen Wert hat, falls sich bei der betreffenden Tierart der Nerv schon in der Schädelhöhle in mehrere Äste geteilt hat. Man kann dann nur einen oder den anderen Ast ausschalten und hoffen, zu einer Analyse der Labyrinthfunktionen zu gelangen. Freilich stimmt die anatomische Trennung der Fasern nicht durchweg mit der funktionellen überein. Auch ist zu bedenken, daß an Tieren geringe Gleichgewichts- oder Muskeltonusstörungen ebenso schwer wie geringe Gehörsstörungen zu beobachten sind.

F. Untersuchung einzelner Teile des Labyrinths.

Sehr bald nachdem Goltz die großartige Idee ausgesprochen hatte, daß das Labyrinth aus zwei verschiedenen Sinnesorganen bestehe, bemühte man sich, auch experimentell eine Teilung des ganzen Organs herbeizuführen,

1) Bartels (Üb. Regulierg. d. Augenstellung durch d. Ohrapparat v. Graefe's Arch. Bd. 76, S. 55) hat bei Kaninchen den Nerv. VIII freigelegt und bei seinem Austritt aus dem Kopfmark durchschnitten.

indem man den akustischen Apparat oder den nicht-akustischen allein auszusehalten versuehte. Oben haben wir bereits die Dursehneidung einzelner Äste des Nerv. VIII erörtert. Hier haben wir zunäehst die gesonderte Zerstörung des Utrikularapparates und des Saeeularapparates zu besprechen.

Da das ganze Labyrinth einen mit Flüssigkeit gefüllten Raum darstellt, dessen einzelne Teile unter sieh kommunizieren, so ist die Eröffnung des Labyrinths und das Ausfließen der Endolymphe stets mit einer Sehädigung aller Teile verbunden. Wir müssen aueh annehmen, daß die zarten Gebilde, auf welehe sieh die Bewegungen der Endolymphe übertragen sollen, bei dem Abfluß der letzteren aus ihrer normalen Lage gebraeht werden, und es ist sehr zweifelhaft, ob sie nachher, wenn es zur Heilung der Wunde gekommen ist, die ursprüngliehe Form und Lage wieder erhalten. Ieh möehte einen etwas übertriebenen Vergleich heranziehen. Wenn man von einem Augapfel eine Hälfte, etwa die rechte, fortschneidet, so wird die zurückbleibende linke Hälfte doeh nie wieder so funktionieren wie früher vor der Durehschneidung. So ungünstig liegen nun freilich die Verhältnisse beim Labyrinth nieht, aber man muß doeh auch hier reeht vorsiehtig bei der Beurteilung der Resultate sein. Die Operationsmethode ist eben sehr unvollkommen. Gehörstörungen naeh Fortnahme der Bogengänge beweisen nieht, daß die letzteren akustisehe Funktionen haben, ebensowenig wie Gleiehgewichtsstörungen naeh Fortnahme der Sehneeke auf nieht-akustisehe Funktionen dieser sehließen lassen.

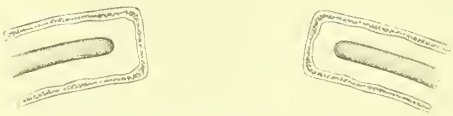


Fig. 6.
Sektionsbefund des knöchernen und häntigen Bogengangs einer Taube. Die vor vielen Monaten eingesetzte Plombe ist abgestoßen worden. Der knöcherne und der häutige Kanal haben sich in idealer Weise wieder geschlossen und voneinander getrennt. (Nach einem Präparat gezeichnet.)

1. Plombierung der Bögen.

Die besproehenen Unvollkommenheiten, die dem Operationsverfahren bei der teilweisen Entfernung des Labyrinths anhaften, fallen bei der Plombierung der Bögen fort. Man kann sagen, daß diese Methode vollkommen ist, und daß ihre Resultate daher aueh vollkommen beweisend sind.

Indem die Plombe den häutigen Kanal gegen die Wand des knöehernen preßt, macht sie ihn undurchgängig für jede fortsehreitende oder wellenförmige Bewegung der Endolymphe. Der häutige Kanal wird dabei nicht geöffnet, und die Endolymphe kann daher nieht abfließen. Die Plombe versehließt aber aueh wieder den knöchernen Kanal, wodureh auch das Ausfließen der Perilymphe verhindert wird. Endlieh wird die Operation dureh die Natur in ganz idealer Weise abgesehlossen. Läßt man nämlich die Tauben längere Zeit am Leben, so findet man nachher bei der Sektion die Plombe gewissermaßen ausgestoßen. Die beiden Enden des knöchernen Kanals haben dureh Knoehenplatten einen Abschluß bekommen, die Enden des häutigen Kanals liegen, ebenfalls geschlossen, frei in der Perilymphe. Diese nun gebildeten Endstüeke der Enden des häutigen Kanals haben mieh immer interessiert. Sie sind so glatt — ieh möehte sagen elegant —, daß sie wie die Enden von Zylindern aussehen, die man auf der Drehbank rund abgedreht

hat. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Verhältnisse im Querschnitt. Auf die Operationsmethodik gehe ich hier nicht ausführlich ein. Ich habe an dem in den „Untersuchungen“ (22) darüber Gesagten nichts zu ändern. Nur einige Bemerkungen seien gestattet.

Für die Masse der Plombe kann man auch eine Anzahl anderer Materialien als das Platin-Gold-Amalgam benutzen. Aber alle diesbezüglichen Versuche haben bisher ergeben, daß sich die dunkle glänzende Farbe des Amalgams sowohl bei der Herstellung der Plombe wie auch bei ihrer Durchsägung und ebenso nach dem Tode des Tieres bei der Sektion sehr vorteilhaft bemerkbar macht. Ferner ist die chemische Resistenz des Amalgams eine Eigenschaft, auf die man nicht gern verzichten möchte.

Wichtig ist es, das Amalgam nach dem Anreiben mit Quecksilber kräftig zwischen Daumen und Zeigefinger zu pressen, um alles unnötige Quecksilber zu entfernen. Die Masse hat dann eine ziemlich feste, fast bröcklige Konsistenz und weicht, in den Kanal gebracht, nicht zu leicht unter dem Stopfer aus, sondern läßt sich gut gegen den häutigen Kanal drücken.

Fig. 7

Plombierzange. In der engen Röhre a gleitet ein Kolben der nur um ein kleines, bestimmtes Stück gehoben werden kann.

Endlich sei noch eine Neuerung erwähnt, von der ich in einigen Fällen, in denen es darauf ankam, schnell zum Ziele zu gelangen, Anwendung gemacht habe. Die nebenstehende Figur zeigt eine kleine Spritze, die wie eine Zange gehandhabt wird. In dem unteren verjüngten Teil (a), dessen Öffnung dem Lumen eines knöchernen Kanals entspricht (0,8 mm), befindet sich ein Kolben, der beim Öffnen der Zange um 2 mm nach oben bewegt wird. In diesem Zustande drückt man die Zange in die Amalgammasse hinein, wodurch sich der unterste Teil von a mit dieser Masse füllt. Dann setzt man die Zange auf die Öffnung, die man in den knöchernen Kanal gemacht hat, derart auf, daß das Ende von a diese Öffnung gut verschließt, und drückt die Zange zu. Man preßt auf diese Weise grade die für eine Plombe nötige Menge Amalgam in den Kanal, und die Plombe ist sofort fertig. Die Sektionen haben die Brauchbarkeit der Methode erwiesen, nur muß natürlich auch in diesem Falle die Amalgammasse nicht zu weich sein. Nach ihrer Erhärtung kann man natürlich auch diese Plombe durchsägen.

2. Reizungen des Labyrinths.

Vor allen Dingen ist anzustreben, daß alle Reizungen an einem möglichst ungehemmten Tiere ausgeführt werden.

Da es normalerweise Bewegungen der Endolymphe sind, die auf die Endapparate des Nerv. VIII reizend wirken, so sind auch die künstlich erzeugten Reize von besonderer Wichtigkeit, die durch Verschiebung des Inhalts der häutigen Kanäle ausgelöst werden. Von prinzipieller Wichtigkeit ist der pneumatische Hammer, weil er eine Bewegung der Endolymphe in der einen und in der entgegengesetzten Richtung verursacht. (Seine Be-

schreibung in den „Untersuchungen“ (22).) Weiter werden die Resultate des pneumatischen Hammers durch Einsetzen von Plomben am glatten Ende des Bogens präzisiert. Die Bewegung der Endolymphe kann dann nur auf das Ampullenende des Kanals wirken. Daß bei diesem Versuche das Tier bei der Rückwärtsbewegung des pneumatischen Hammers genau die umgekehrte Bewegung macht wie bei der Vorwärtsbewegung des Hammers, ist eine grundlegende Tatsache für das Verständnis der nicht-akustischen Labyrinthfunktionen.

Sehr viel weniger präzise, aber immerhin auch entgegengesetzte Kopfbewegungen der Taube erhält man, wenn man über das eine Ende eines

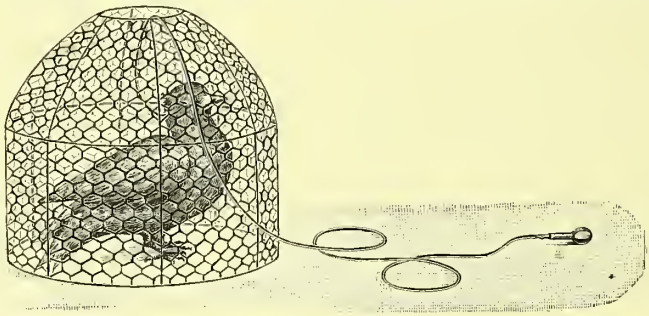


Fig. 8

Die mechanische Reizung einer Ampulle durch den pneumatischen Hammer. Die Taube befindet sich dabei völlig frei unter der Drahtglocke.

querdurchtrennten knöchernen Kanals einen Gummischlauch zieht und durch diesen auf den Kanalinhalt drückt oder an ihm saugt. Diese Methode ist aber viel weniger beweisend, da man ja auf die Peri- und Endolymphe gleichzeitig wirkt. Es bleibt dabei unsicher, wie eigentlich der Reiz zustande kommt. Es sind aber diese Versuche aus einem andern Grunde von Wichtigkeit.

Bei volständiger Ausschaltung eines Labyrinths sehen wir auf der Höhe der Störung, wenn keine Reizerscheinungen von seiten der Nervenstümpfe mehr bestehen und sich andrerseits die Ersatzerscheinungen noch nicht genügend ausgebildet haben, die vollständige Kopfverdrehung (Stellung VI) eintreten. Als größten Reiz müssen wir daher denjenigen bezeichnen, der die entgegengesetzte, aber ebenso ausgiebige Kopfverdrehung hervorruft. Dies ist nun mit keinem künstlichen Reiz möglich, mit Ausnahme des Reizes, den man erzeugt, wenn man in oben beschriebener Weise durch den angesetzten Schlauch den Inhalt des Labyrinths zum Ausfließen bringt. Nach solchem Ansaugen der Labyrinthflüssigkeiten wird das Organ für mechanische Reize ganz unerregbar und bleibt es, auch wenn man die ausgetretene Flüssigkeit wieder zurückdrängt. Diese Tatsache ist für die Beurteilung aller Versuche, bei denen das Labyrinth in weitem Umfange eröffnet wird, von großer Wichtigkeit.

Der Gummischlauch kann auch wandständig mit einem der knöchernen Kanäle verbunden werden. Zu diesem Zwecke wird eine kleine Glasröhre wandständig auf den angebohrten Kanal aufgekittet und über diese der Gummischlauch gezogen. Der häutige Kanal bleibt dabei uneröffnet.

3. Chemische Eingriffe.

Es ist sehr darauf zu achten, daß die in den knöchernen Kanal gebrachten Substanzen nicht mechanisch wirken. Zu den physikalischen Kräften, die dabei in Betracht kommen, gehört auch die Diffussion und die Kapillarität. Letztere wird ausgeschlossen, wenn man mit der einwirkenden Substanz die uneröffneten knöchernen Kanäle befeuchtet. Viele Substanzen, wie Chloroform, Ammoniak und andere, braucht man nur in den einen Gehörgang zu träufeln und erhält doch schon nach wenigen Minuten die Wirkung auf das Labyrinth. Alle bisher untersuchten Substanzen wirken lähmend mit Ausnahme des Ammoniaks, das ein kurz vorübergehendes Reizstadium vor der Lähmung erzeugt (Friedmann (26).) Wahrscheinlich beruht die Wirkung des Ammoniaks auf seiner Alkaleszenz.

Sehr schnell lähmend wirkt das salzsaure Kokain. König (34), Gaglio (28) brachten einige winzige Kristalle dieser Substanz auf den freigelegten aber nicht durchtrennten häutigen Kanal und sahen danach sehr bald die charakteristischen Ausfallserscheinungen eintreten. Es empfiehlt sich diese Methode besonders zur Demonstration der Bogengangsstörungen, da man das Entstehen derselben auf diese Weise leicht beobachten kann.

4. Thermische Eingriffe.

Auch bei der Wärmeeinwirkung muß man darauf achten, daß sie sich nicht mit mechanischen Eingriffen, durch die Einführung des erwärmten Instruments oder durch Gasentwicklung, kombiniert oder gar nur durch diese vorgetäuscht wird.

Interessant ist die Einwirkung der Kälte. Man legt den Can. extern. frei und bringt den Inhalt desselben durch einen feinen Strahl eines Äthersprays [1]) zum Gefrieren. Die Wirkung ist der einer Durchschneidung sehr ähnlich, verschwindet aber später wieder.

5. Elektrische Eingriffe.

Für die elektrischen Reize gelten die auch sonst anzuwendenden Regeln. Eine besondere Methodik für Labyrinthreizungen gibt es eigentlich nicht. Da die reizbaren Gebilde sehr dicht nebeneinander liegen und mannigfach durch die Knochensubstanz und die Flüssigkeiten der Bogengänge miteinander verbunden sind, so hat man sich vor Stromschleifen besonders zu hüten. Unter solchen Umständen ist die unipolare Reizung besonders empfehlenswert. Die indifferente Elektrode wird bei Hunden oder Kaninchen an den Bauch gelegt und durch eine feuchte Binde befestigt. Bei den Tauben kann man einen blanken Draht durch die Crista sterni ziehen. Will man ein ganzes Labyrinth dem Einfluß des elektrischen Stromes unterwerfen, so werden kleine Schwammelektroden in den äußeren Gehörgang gesteckt. Ein kleiner Bügel, der bei Tauben die beiden Elektroden festhält, findet sich in meinen „Untersuchungen“ abgebildet.

1) Man kann wohl bequemer Chloräthyl anwenden, worüber ich aber keine Erfahrungen besitze.

Literatur.

(Die in Klammern zugefügten Bemerkungen geben an, welche Beziehung die betreffende Arbeit zu der in dieser Abhandlung interessierenden Methodik hat, falls dies nicht schon aus dem Titel der Arbeit hervorgeht.)

1. Ach, N., Üb. d. Otolithenfunktion u. den Labyrinthtonus. Pflügers Arch. Bd. 86. 1901. (Entfernung d. Otolithensackes bei Fröschen vom Rachen aus. Beschreibung von Ewalds Rektostat.)

2. Alexander, G., u. Kreidl, A., Anatom. physiolog. Studien üb. d. Ohrlabyrinth d. Tanzmaus. Pflügers Arch. Bd. 88. (Angaben über den Drehschwindel, den galvanischen Schwindel, die Erhaltung des Gleichgewichts usw. d. Tanzmäuse.)

3. Bárány, R., Physiol. u. Pathol. (Funktions-Prüfung) des Bogengang-Apparates beim Menschen. Leipzig u. Wien, Deuticke 1907. (Apparat, um beim Menschen die Rollung der Augen zu untersuchen. Bei Tieren wohl in ähnlicher Weise verwendbar.)

4. Bechterew, W., Ergebnisse d. Durchschneidg. d. N. acusticus usw. Pflügers Arch. Bd. 30. 1883. (Durchschneidg. d. Nerv. VIII an Hunden. Durch ein Trepanloch in der Okzipitalschuppe wird das Messer eingeschoben.)

5. Beer, Th., Vergleichend-physiol. Studien zur Statozystenfunktion I. Üb. d. angebl. Gehörsinn u. das angebl. Gehörorgan d. Crustaceen. Pflügers Arch. Bd. 73. 1898.

6. Bernard, Cl., Leçons sur la physiol. et la pathol. du système nerveux. Paris 1858. (An Säugern hat B. den Nerv. VIII manchmal im Schädel durchschnitten, indem er mit einer Scheere auf der Bahn der vena mastoidea eindrang. Sonst vom äußeren Gehörgang oder von der bulla ossea aus.)

7. Bethe, A., Die Otocyste von Mysis. Zool. Jahrbücher. Bd. 8. Abt. f. Morph.

8. — — Üb. d. Erhaltg. des Gleichgewichts. Biolog. Centrlbl. 14. 1894; 1 Mitt. S. 95 u. 2 Mitt. S. 563. (Untersuchungen üb. das Gleichgewicht an lebenden u. toten Tieren: Tauben, Fischen, Krustazeen, Wasserkäfern, Asseln u. a.)

9. — — D. Nervensystem von Carcinus Maenas. Arch. f. mikrosk. Anat. u. Entwicklgsgesch. Bd. 50. 1897. (S. 530. Die Tiere werden unter einem Wasserdruck von 4,5 Atm. gebracht u. in bezug auf die Funktion ihrer Otozysten untersucht.)

10. Biehl, K., Üb. d. intrakranielle Durchtrenng. des nerv. vestibuli u. deren Folgen. Wiener Akad. Math. naturw. Kl. 109. 3 1900. (Bei Pferd u. Schaf wird allein der ram. vestibularis des Nerv. VIII durchtrennt.)

11. Breuer, J., Beiträge zur Lehre vom statischen Sinne usw. Medizin. Jahrbücher, herausgeg. von d. k. k. Gesell. d. Ärzte 1875. (Ein Anterior der einen Seite u. ein Posterior der anderen Seite werden bei derselben Taube durchschnitten, sie bilden zusammen eine physiologische Hauptebene.)

12. — — Über Ewalds Versuch mit dem „pneumat. Hammer". Zeitschr. f. Sinn. physiol. Bd. 42.

13. Bornhardt, A., Experim. Beiträge zur Physiol. d. Bogengänge d. Ohrlabyrinths. Pflügers Arch. Bd. 12. 1876. (Durchschneidungen der Bögen an Kaninchen.)

14. Brown, T. Graham, Die Atembewegungen des Frosches u. ihre Beeinflussung durch die nervösen Zentren u. durch das Labyrinth. Pflügers Arch. Bd. 130. 1909. (Entfernung d. Otolithen beim Frosch. Beobachtung mit Ewalds Rektostat.)

15. Bunting, M., Über d. Bedeutg. d. Otolithenorgane für die geotropischen Funktionen von Astacus fluviatilis. Pflügers Arch. Bd. 54. (Entfernung d. Otolithen beim Flußkrebs. Die kleinen Antennen werden dicht an der Basis abgeschnitten.)

16. Capaldo, J., La cosidetta anestesia cocainica dei canali semicircolari. Arch. ital. di Otolog. 19. (Cntrlbl. f. Physiol. 22, S. 817. 1908.)

17. Clark, Gayford P., Üb. Gleichgewichtsphänomene in gewissen Crustaceen. Centrlbl. f. Physiol. 1894. Bd. 8. (Entfernung der Otozyste.)

17a. — — On the relation of the otocysts to equilibrium phenomena in gelasimus pugilator and platyonichus ocellatus. Journ. of Physiol. Bd. 19, 1896.

18. v. Cyon, E., Gesammelte physiol. Arbeiten. Berlin 1888, S. 297. Kaninchen. Durchschneidg. des Nerv. VIII. (1. Methode: Mit einem kleinen stark gekrümmten schneidenden Instrument geht man unterhalb des Flocculus ein u. zerschneidet den

Nerven, wo er in den Fallopischen Kanal eintritt. 2. Methode: Man macht ein Loch in d. Hinterhauptbein u. kann dann durch dieses den Nerven sehen u. durchschneiden. 3. Methode: Man durchtrennt nur die Ligamente zwischen Atlas u. Hinterhauptbein u. schiebt das Messer längs der Schädelbasis vorwärts.)

19. Delage, Yves, Sur une fonction nouvelle des otocystes comme organes d'orientation locomotrice. Arch. de zool. expér. et générale II. Sér. Tome 5. 1887.

20. Dreyfuß, R., Üb. d. Einfluß d. Chinins auf das Tonuslabyrinth. Zeitschr. f. Ohrenhlk., Bd. 49. 1905. (Bei Meerschweinchen wird das Chinin subkutan injiziert.)

21. Emanuel, G., Üb. d. Wirkg. d. Labyrinthe u. des Thalamus opticus auf d. Zugkurve des Frosches. Pflügers Arch. Bd. 99. 1903. (Beeinflussung d. Zugkurve des Frosches durch die Labyrinthe. Methodik der Zugkurve.)

22. Ewald, J. Rich., Physiol. Untersuchgn. über d. Endorgan des Nerv. VIII. Wiesbaden 1892. (An Tauben: Fortnahme des ganzen Labyrinths; Plombierung der Bögen; Verödung der Blutsinus auf mechanischem Wege; Erzeugung von Drehschwindel durch passive asymmetrische Pendelbewegungen des Kopfes. Pneumatischer Hammer; Präparat der Brücke; Galvanokauter mit Fußkontakt; Horizontalzange; Taubenhalter. Fortnahme des ganzen Labyrinths an Fröschen, Dohlen, Kakadus, Salamandern, Kaninchen und Hunden.)

23. — — Zur Physiol. d. Labyrinths. 1 Mitt. Pflügers Arch. Bd. 41. 1887. (Vergleichend physiologische Beobachtgn. bei verschiedenen Vögeln. Es wird der Externus immer in genau der gleichen Weise durchtrennt.)

24. Fano, G. u. Masini, G., Intorno agli effetti delle lesioni portate sull'organo dell' udito. Sperimentale 47. 1893. (Bei Tauben wird in einigen Fällen nur die Schnecke, in anderen nur der Bogengangsapparat entfernt. Versuche an Schildkröten.)

25. Flourens, P., Recherches expérim. sur les propriétés et les fonctions du système nerveux etc. Paris 1842. (Durchschneidungen der Bögen an Kaninchen.)

26. Friedmann, H., Üb. künstl. Reizg. d. Ohrlabyrinths. Diss. Straßburg 1901. (Chemische Reizungen an Kaninchen, Meerschweinchen u. Tauben, teilweise durch Einträufelung in den äußeren Gehörgang.)

27. Fröhlich, A., Studien üb. d. Statozysten. Pflügers Archiv. Bd. 102. 1904. (Versuche an Cephalopoden.)

27a. — — Studien üb. d. Statozysten wirbelloser Tiere. Ebenda. Bd. 103. 1904.

27b. — — Üb. d. Einfluß d. Zerstörg. d. Labyrinths beim Seepferdchen usw. Ebenda. Bd. 106. 1904.

28. Gaglio, G., Expériences sur l'anesthésie du labyrinthe de l'oreille chez les chiens de mer („Scyllium catulus"). Arch. ital. d. biol. 38. 1903. (Kokainisierung der Bögen bei Haien. Injektion von Quecksilbertröpfchen. Messende Bestimmungen der Schwächung der Schwanzmuskulatur.)

29. Girard, H., Recherches sur la fonction des canaux sémi-circulaires de l'oreille interne chez la grenouille. Arch. d. physiol. norm. et pathol. 1892, p. 353. (Durchschneidg. d. Nerv. VIII nach der Methode von Schiff. „On incise la muqueuse buccale sur la capsule auditive, que l'on ouvre ensuite largement à l'aide d'une petite pince tranchante, et on sectionne le tronc nerveux dans le conduit auditif interne, avant son entrée dans la cavité tympanique." Es kommt vor, daß der Nerv nicht ganz durchschnitten wird, zur Sicherheit nimmt G. auch das ganze Labyrinth fort.)

30. Goltz, Fr., Üb. d. physiol. Bedeutung d. Bogengänge d. Ohrlabyrinths. Pflügers Arch. Bd. 3. 1870. (Bei Tauben wird das Labyrinth ausgekratzt.)

31. Henri, V., Effets de la destruction du labyrinthe chez les serpents. Compt. rend. d. l. soc. d. biol. 1899. (Fortnahme der Labyrinthe bei Nattern.)

32. Ilyin, P., Das Gehörbläschen als statisches Organ bei Pterotracheïden. Physiologiste russe (Moskau) II. 1900.

32a. — — Das Gehörbläschen als Gleichgewichtsorgan bei den Pterotracheïden. Centralbl. f. Physiol. 13. 1900.

32b. — — Die Rolle des hydrostatischen Bläschens bei den Siphonophoren. Centralbl. f. Physiol. 14. 1900.

33. Kishi, K., Das Gehörorgan d. sog. Tanzmaus. Zeitschr. f. wiss. Zool. Bd. 71. 1902.

34. Koenig, Ch., Étude expér. des canaux sémicirculaires. Paris 1897. (Kokainisierung der Bögen; Literaturverzeichnis.)

35. Kreidl, A., Weitere Beiträge zur Physiol. d. Ohrlabyrinths. I. Mittlg. Versuche an Fischen. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. 101. 3. 1892. (Entfernung der Otolithen bei Haifischen.)

36. — — Weitere Beiträge zur Physiol. d. Ohrlabyrinths. II. Mitteilg. Versuche an Krebsen. Wiener Sitzgsber. Math.-naturw. Kl. 102. 3. S. 149. 1893. (Einführung eiserner Otolithen bei Palaemon xiphios u. squilla.)

37. — — Wiener klin. Wochenschr. N. 17. 1896. (Durchschneidg. des Nerv. VIII an Katzen.)

38. Kubo, J., Üb. d. vom N. acusticus ausgelöst. Augenbeweggn. II. Mitt. Versuche an Fischen. Pflügers Arch. Bd. 115. 1906. (Versuche an Scyllium canicula, Acanthias vulgaris, Mustelus laevis, Raja clavata, Petromyzon marinus, Pleuronectes platessa u. a. m. Beschreibung von Fischhaltern.)

39. Kuffler, O., Üb. d. elektr. Reizg. d. Nerv. VIII u. seiner Endorgane beim Frosch. Pflügers Arch. Bd. 83. 1901. (Reizung des Stammes des Nerv. VIII beim Frosch.)

40. Laudenbach, J., Zur Otolithenfrage. Pflügers Arch. Bd. 77. 1899. (Versuche an Siredon pisciformis; Entfernung der Otolithen bei diesen Tieren vom Rachen aus; Entfernung der Otolithen beim Frosch.)

41. Lee, F. S., A study of the sense of equilibrium in fishes. Journ. of Physiol. Vol. 15. (Durchschneidg. d. Nerv. VIII, Entfernung der Otolithen, Reizg. der Bogengänge. Besonders bei Galeus canis.)

42. Loeb, J., Über Geotropismus bei Tieren. Pflügers Arch. Bd. 49. 1891. (Entfernung von Otolithen beim Haifisch.)

43. Lyon, E. P., A contribution to the comparative physiology of compensatory motions. Amer. journ. of physiol. 3. 1899. (Versuche an Asilus, Krabben, Flundern. Entfernung d. Otolithen.)

44. Mach, E., Beiträge zur Analyse der Empfindungen 1886. (Beschreibung eines Zyklostaten. Vergl. auch (22) S. 138.)

45. Matte, Fr., Ein Beitrag zur Funktion der Bogengänge d. Labyrinths. Diss. Halle 1892. (Einführg. von Roßhaaren in die knöchernen Bögen bei Tauben.)

46. Murbach, L., The static function in Gonionemus. Amer. journ. of physiol. 10. 1903. (Versuche über die Otozysten der Medusen.)

47. Muskens, L. J. J., Üb. eine eigentümliche kompensatorische Augenbewegung der Oktopoden mit Bemerkungen über deren Zwangsbewegungen. Engelmanns Arch. 1904. (Entfernung der Statozysten bei Eledone.)

48. Quix, F. H., Experimenten over de functie van het labyrinth bij haaien. Tijdschr. d. Nederl. Derk. Ver. Arch. f. Anat. 8. 1903. (Unterbindg. von Bogengängen bei Haien. Entfernung der Otolithensäcke.)

49. Rädl, E., Üb. d. Lichtreaktionen der Arthropoden auf d. Drehscheibe. Biol. Centralbl. 26. 1902. (Angaben über die Reaktionen von Insekten auf der Drehscheibe.)

50. van Rossem, A., Gewaarwordingen en reflexen, opgewekt vannit de halfcirkelvormige kanalen. Diss. Utrecht 1907. (Drehscheibe mit Registriervorrichtungen für Versuche am Menschen.)

51. Schaefer, K. L., Funktion u. Funktionsentwickelung der Bogengänge. Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. Bd. 7. 1894. (Bei Froschlarven kann man erst nach der Ausbildg. d. Bogengänge Drehschwindel erzeugen.)

52. Schépiloff, C., Mémoires de la société de physique et d'histoire nat. de Genève. T 32. Nr. 6. 1895. (Der Nervenstamm wird entweder von oben nach Eröffnung der Schädelkapsel oder vom Munde aus ohne Schädeleröffnung durchschnitten. Durchschneidung der einzelnen Äste: „La section des rameaux doit être faite en découvrant la racine du nerf auditif par en haut. Il faut choisir de très grosses grenouilles, et encore tous les individus ne conviennent pas également, voici pourquoi. La division du nerf auditif en deux rameaux se fait quelquefois si près de la paroi de l'oreille interne qu'il est impossible de les sectionner séparément, il faut donc choisir les individus chez lesquels la division en ramcaux se fait très près de la moelle, et sur lesquels on peut suivre les trajets séparés des deux branches de l'auditif.“)

53. Schiff, M., Lehrbuch der Muskel- u. Nervenphysiologie. Lahr 1858—59. (S. 399 Durchschneidg. des Nerv. VIII: „Ich habe eine Durchschneidung im Schädel manchmal von hinten her vorgenommen, indem ich mit einem schmalen Instrument bei Kaninchen durch die Höhle des Hinterhauptbeins einging, in der ein kleiner Anhang des Cerebellum liegt, u. dasselbe vorsichtig schief nach innen u. vorn führte." — „Bei Fröschen geschieht seine Durchscheidung ohne alle Zerrung am besten dann, wenn die Medulla oblongata von vorn, also vom Munde her bloßgelegt wird.")

54. — — Arch. des sciences physiques et naturelles. 3 période. T. 25. Genève 1891. („Ma méthode de préparer le nerf acoustique en le découvrant par sa face antérieure (Traité de 1858, p. 399) permet de la couper à son origine dans cavité crânienne ou à côté de cette cavité, dans le canal auditif interne. Les deux modifications donnent les mêmes résultats mais depuis quelques années j'ai choisi la dernière pour donner une sûreté objective que je n'ai pas lésé directement la moelle allongée.") — Eine Ergänzung der Methoden Schiffs findet man bei Girard (29) u. Schépiloff (52).

55. Schrader, M., Zur Physiol. d. Froschgehirns. Pflügers Arch. 41. S. 88. 1887. (In bezug auf die Herausnahme der halbzirkelförmigen Kanäle sagt Schrader: „Die Operation ist vom Munde her ohne irgendwelche Nebenverletzungen ausführbar, besonders kann jede Beschädigung des zentralen Nervensystems mit ebensolcher Sicherheit ausgeschlossen werden." Weitere Angaben macht er nicht.)

56. Sewall, H., Experiments upon the Ears of Fishes with reference the Function of Equilibrium. Journ. of Physiol. Vol. 4. 1883. (Entfernung d. Otolithen an Haifischen und Rochen.)

57. v. Stein, St., Die Lehren von den Funktionen der einzelnen Teile des Ohrlabyrinths. Aus dem Russischen übersetzt. Jena 1894. Literaturverzeichnis mit sehr ausführlichen Inhaltsangaben.)

58. Steiner, J., Die Funktionen des Centralnervensystems u. ihre Phylogenese. Leipzig 1888. (Entfernung d. Otolithen bei Haifischen.)

59. Stern, W., Die Literatur üb. d. nicht-akustische Funktion d. inneren Ohres. Arch. f. Ohrenhlknde. Bd. 39. 1895.

60. Thomas, A., Étude expérim. sur les fonctions du labyrinthe etc. Revue intern. de Rhinologie, Otologie etc. Paris 1899. (Operationen an Hunden.)

61. Thury, M., Le cyclostat, nouvel instrument d'optique etc. Arch. des sciences physiques et naturelles. Févr. 1896. (Beschreibung eines Zyklostaten vgl. auch (22) S. 138.)

62. Tomaszewicz, A., Beiträge zur Physiol. d. Ohrlabyrinths. Diss. Zürich 1877. (Kaninchen. Durchschneidg. d. Nerv. VIII vom äußeren Gehörgang aus.)

63. Trendelenburg u. Kühn, Vergleich. Untersuchgn. zur Physiol. d. Ohrlabyrinths der Reptilien. Arch. f. Anat. Physiol. Physiol. Abt. 1908.

64. Tschachotin, S., Die Statozyste d. Heteropoden. Zeitschr. f. wiss. Zool. 90.

65. v. Uexküll, Leitfaden in d. Studium d. exp. Biologie d. Wassertiere. Wiesbaden 1905.

66. Verworn, M., Gleichgewicht u. Otolithenorgan. Pflügers Arch. Bd. 50. (Entfernung der Statolithen bei Ctenophoren.)

67. Winkler, C., The central course of the Nervus octavus and its influence on motility. Verhandlgn. d. Akad. d. Wiss. zu Amsterdam (tweede sectie) Deel 14 N. 1 1907.

III.

Untersuchungsmethodik der akustischen Funktionen des Ohres.

Von

Karl L. Schaefer in Berlin.

Mit 92 Figuren.

I. Äußeres Ohr.

Unter dem äußeren Ohre verstehen wir die Ohrmuschel und den Gehörgang bis zum Trommelfell, das ihn abschließend die Grenze gegen das Mittelohr bildet.

1. Die Ohrmuschel.

Von der Ohrmuschel sagt Johannes Müller[1]), daß sie teils Reflektor, teils Kondensator und Leiter der Schallwellen sei. Als Reflektor käme vorzüglich die Concha in Betracht, die die Schallwellen der Luft gegen den Tragus werfe, von wo sie in den Gehörgang gelangten. Den nicht durch Reflexion an die Luft zurückgegebenen Teil der Schallbewegung nehme der Knorpel als Selbstleiter in sich auf und übertrage ihn wie ein fester Körper auf die Gehörgangswände und weiter auf Trommelfell und Kopfknochen.

Seitdem sind verschiedene Forscher[2]) bemüht gewesen, die Leistungsfähigkeit der Ohrmuschel in diesen beiden Beziehungen zu studieren, indem man sie bald auf einer, bald auf beiden Seiten zugleich vom Hörakt auszuschließen suchte und dann den Grad der Beeinträchtigung des Hörens prüfte. Zu diesem Zwecke bedeckte man entweder die Muschel und den Raum hinter ihr unter Freilassung des Gehörgangs mit Brotteig, mit einer Mischung von Wachs und Öl (1:3), mit Hartgummiplatten, auch wohl mit Wattepolstern und Bandagen, oder man setzte ein Glasröhrchen auf den Gehörgang, um so dessen Öffnung gleichsam in den Raum hinaus zu verlegen und damit von der Muschel unabhängig zu machen.

1) Handbuch der Physiologie des Menschen, 2. Bd., S. 452, Koblenz 1840.

2) Literatur-Übersicht bei K. Münnich, Über die Wahrnehmung der Schallrichtung; Passows und Schaefers Beiträge z. Anat., Physiol., Pathol. u. Therap. d. Ohres, d. Nase u. d. Halses, Bd. 2, Heft 1, 1908.

Die Ansicht Johannes Müllers, daß die Schallwellen an den Ohrmuschelflächen und im Gehörgang in derselben Weise von einer Wand zur anderen reflektiert werden könnten, wie wenn sie Lichtstrahlen wären und die Haut ein Spiegel, ist von Mach als irrtümlich erwiesen worden. Dieser Forscher[1]) hat (zum Teil in Gemeinschaft mit A. Fischer[2])) gezeigt, daß eine reguläre Reflexion hier nur dann stattfinden könnte, wenn die Wellenlängen des Schalles ebenso, wie es beim Lichte der Fall ist, sehr oft in den Lineardimensionen der reflektierenden Fläche enthalten wären. Die Schallwellen der hörbaren Töne sind aber so groß, das für die Ohrmuschel und den Gehörgang gerade das Gegenteil stattfindet.[3])

Hänge ich in einiger Entfernung vor meinem Gesichte eine Taschenuhr auf und nähere in ähnlicher Weise, wie es Lauschende oder Schwerhörige tun, die flach gewölbten Hände den Ohrmuscheln, ohne indessen letztere direkt zu berühren, so wird das Ticken merklich lauter. Es findet hier offenbar eine Sammlung der Schallstrahlen statt, allerdings eben nicht durch Reflexion sondern durch Beugung, durch Entlanggleiten an der Handfläche auf den Gehörgang zu. Die Erscheinung wird noch etwas deutlicher, wenn die Hände mit Kopf und Ohrmuscheln in Kontakt gebracht werden. Es wäre nicht uninteressant, eine größere Reihe von Versuchen hierüber mit verschieden gestalteten und gerichteten Flächen sowie vor allem auch mit verschieden hohen Tönen anzustellen. Die Ohrmuschel selbst mit ihrer eigenartigen Form und ihrem besonderen Anheftungswinkel würde dann einen Spezialfall dieser Untersuchung darstellen.

Was die von Vielen vertretene Auffassung anlangt, die Ohrmuschel nehme einen nennenswerten Teil der Schallwellen aus der Luft in sich auf, so steht zunächst so viel fest, daß der Ohrknorpel unmittelbar auf ihn übertragene Schallwellen besser leitet als der Schädel. „J. Müller machte diese Beobachtung mit Hilfe einer Pfeife, und ich kann dieselbe nach Stimmgabelversuchen nur bestätigen. Wenn eine fest gegen den Warzenfortsatz gedrückte a^1-Gabel an dieser Stelle abgeklungen ist, wird sie meist noch wieder hörbar beim Aufsetzen auf irgendeinen Punkt der Ohrmuschel; besonders bevorzugt ist in dieser Beziehung der Tragus und namentlich dessen Vorderfläche: hier kann man die Gabel oft noch mehrmals abheben und wieder aufsetzen, ehe sie im letzteren Falle tonlos gefunden wird."[4]) In welchem Grade der Knorpel durch ihn treffende Schallwellen der Luft von verschiedener Wellenlänge zum Mitschwingen veranlaßt wird, könnte man in ähnlicher Weise zu ermitteln versuchen, wie man es mit vibrierenden Membranen macht, nämlich durch Anbringung eines Spiegelchens, das einen feinen Lichtstrahl bei ruhendem Knorpel als Punkt, bei schwingendem Knorpel als

1) Archiv f. Ohrenheilk., Bd. 9, S. 72, 1875.

2) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 149, S. 421, 1873.

3) Trotzdem diese Beweisführung Machs einen fundamentalen Fortschritt der physiologischen Akustik bedeutete — sie gilt natürlich geradeso für den Kehlkopf und sein Ansatzrohr wie für das Ohr — finden sich leider von Zeit zu Zeit immer noch wieder Autoren, nach denen die Schallstrahlen im Ohre, sogar im inneren Ohre (!), und im Munde zickzackig hin- und hergeworfen werden, als handle es sich um Bälle beim Billardspiel.

4) Zitiert aus meinem Artikel „Gehörssinn" in Nagels Handbuch der Physiologie, Bd. 3, S. 549, 1905.

Streifen auf einen Schirm reflektiert. Oder man müßte, falls diese Methode versagen sollte, probieren, die Oszillationen eines auf dem Knorpel befindlichen hellen Pünktchens mikroskopisch zu verfolgen.

2. Der Gehörgang.

Der Gehörgang dient den Schallwellen auf ihrem Wege zum Trommelfell als Zuleitungsröhre. Eine sowohl klinisch als auch praktisch wichtige Frage ist die, wieweit das Hörvermögen herabgesetzt wird, wenn er durch Cerumen verstopft ist, oder wenn man ihn absichtlich mit dem Finger, mit einem Antiphon oder auf sonst irgendeine Weise verschließt. Die übliche Prüfung mit Konversations- und Flüstersprache und die Angabe, aus wieviel Meter Entfernung dieselbe noch gehört wird, gibt nur einen oberflächlichen, keinen eigentlich wissenschaftlichen Anhalt für den Grad der Gehörstörung. Dazu ist vielmehr eine möglichst genaue Feststellung der Hörschärfe für Töne und zwar für mindestens einen oder zwei Töne aus jeder Oktave erforderlich, da bekannt ist, daß die Perzeption tiefer Töne stärker als diejenige hoher unter der Verlegung des Gehörganges leidet. Wie kürzlich im Physiologischen Laboratorium der Berliner Charité-Ohrenklinik angestellte Versuche dieser Art ergeben haben, kommt es ziemlich auf dasselbe hinaus, ob man den Tragus gegen den Ohreingang preßt, oder ob man den Finger, eines der gebräuchlichen Antiphone, einen nassen Wattepfropfen oder einen tief eindringenden Gazetampon in den Meatus führt. Die Schwerhörigkeit ist in allen diesen Fällen ungefähr die gleiche; es zeigt sich nur der Tragus- und Fingerverschluß den anderen in der Wirkung etwas überlegen. Der Effekt bleibt im ganzen übrigens relativ gering. Denn abgesehen von den tiefsten Edelmannschen Gabeln kommen alle einigermaßen lauten Töne zur Perzeption bis in die höchsten Regionen hinauf, sei es, daß sie den obturierenden Gegenstand einfach durchdringen und dann doch noch auf dem Luftwege zum Trommelfell gelangen, sei es, daß sie von den Kopfknochen aus der Luft aufgenommen werden.

Im Anschluß an ältere Experimente von Eduard Weber[1]) hat Schmidekam[2]) Beobachtungen darüber angestellt, wie das Hören sich verändert, wenn man den Gehörgang mit Wasser ausfüllt. Er ließ diese Prozedur an sich vornehmen, während er sich in einer Badewanne in Seitenlage befand, das betreffende Ohr eben oberhalb des Niveaus haltend; ein Gehilfe besorgte die Füllung des Gehörganges mit einer Spritze, wobei er genau darauf achtete, daß die Luft aus dem Gehörgang vollständig entfernt wurde. Erst dann „tauchte ich", sagt Schmidekam, „mit dem Ohre ganz unter und brachte nun das zweite Ohr in gleicher Weise an die Oberfläche. Nachdem nun das beide Ohrgänge füllende Wasser mit dem Wasser der Badewanne kommunizierte, begannen die Hörversuche, indem ich bald möglichst tief untertauchte[3]), bald — für gewisse Beobachtungen — Nasen- und

1) Berichte d. Kgl. Sächsischen Gesellsch. d. Wissenschaften, Mathem. Kl., Leipzig 1851, S. 29.

2) Experimentelle Studien zur Physiologie des Gehörorganes; Mediz. Dissertation, Kiel 1868.

3) Die Atmung geschah während dessen durch einen Schlauch.

Mundöffnung aus dem Wasser hervorhielt.“ Als Resultat ergab sich, daß alles dumpfer und schwächer (bzw. gar nicht mehr) gehört wurde und die Fähigkeit, die Schallrichtung zu bestimmen, schwand. Die Methode ist jedoch insofern nicht eindeutig, als dabei ein Teil des in der Luft erzeugten Schalles durch Reflexion an der Wasseroberfläche für die Perzeption verloren geht und die ins Wasser eintretenden Schallwellen die Kopfknochenleitung in anderem Maße in Anspruch nehmen, als sie es in der Luft tun. Schmidekam hätte nach Füllung der Gehörgänge unter Wasser mit dem Kopfe über Wasser beobachten sollen, wobei freilich Maßregeln zur Verhütung des Wasserabflusses aus den Ohren nötig gewesen wären.

Eine besondere akustische Eigentümlichkeit des Gehörganges besteht darin, daß er als einseitig (nämlich vom Trommelfell) gedeckte kurze Röhre einen Resonator für gewisse Töne der viergestrichenen Oktave darstellt. Mehrere Autoren haben die Höhenlage dieses Resonanzgebietes bestimmt, in erster Linie Helmholtz. Er fand, daß die Töne der genannten Region bei den Klavieren besonders scharf klangen, daß sie aber milder wurden und dafür andere Töne an Schärfe gewannen, wenn er den Gehörgang durch kleine Glasröhren verlängerte. Sein rechtes Ohr war am meisten empfindlich für f^4, das linke für c^4. Wenn er Luft in die Trommelhöhle preßte, ging die Resonanz auf cis^4 bzw. gis^3 herunter. Den Eigenton einer Röhre mit scharfrandiger Öffnung pflegt man sonst dadurch festzustellen, daß man (etwa mit dem Munde) einen Luftstrom darüber hin bläst. Die Tonhöhe wechselt aber mit der Größe und Gestalt der Öffnung und wird zweifellos davon beeinflußt, wenn letzterer ein Gebilde nach Art der Ohrmuschel vorgelagert ist. So erkläre ich mir, daß Lucae[1]) beim schwachen Anblasen des Ohres ein Geräusch von der ungefähren Höhe des c^1 und Stumpf[2]) bei dem gleichen Versuch f^1 erhielt. Lucaes Auffassung, daß dies von der Mitwirkung der Paukenhöhle herrühre, dürfte bei der Kleinheit und den sonstigen Verhältnissen der in Betracht kommenden Gebilde ziemlich fragwürdig sein.

II. Mittelohr.

1. Das Trommelfell.

Die Bewegungen, deren das Trommelfell fähig ist, sind teils mechanische, teils Schallschwingungen. Beide Arten sind hier nacheinander zu besprechen.

Schmidekam hat in seiner eben erwähnten Dissertation auch Versuche darüber mitgeteilt, welchen akustischen Effekt die Berührung und Verschiebung des Trommelfelles durch Sonden hat. Er benutzte dazu an der Spitze knopfförmig verdickte federnde Stahlstäbchen oder nicht federnde Glasfäden. Wiederholt wurde auch das hintere Ende der Sonde an einer Membran befestigt, welche über einem Pappring oder einer Glasröhre aus-

1) Verhandl. d. Berl. Physiolog. Gesellsch.; Du Bois-Reymonds Arch. f. Anat. u. Physiol., 1883.

2) Tonpsychologie, Bd. 1, S. 371, 1883.

gespannt war. Jede Bewegung der Sonde auf dem Trommelfell macht mehr oder weniger laute Geräusche. Der bloße Druck der auf dem Trommelfell ruhenden Sonde hat keinerlei Schallempfindung zur Folge. Wenn aber während dessen der Beobachter selbst spricht, erscheint ihm die eigene Sprache verstärkt und in das betreffende Ohr verlegt; auch schwingt alsdann die Sonde und namentlich eine mit ihr verbundene Membran so kräftig, daß man nötigenfalls die Trommelfellbewegung damit registrieren könnte. Die dem Trommelfell anliegende Sonde leitet, so sagt Schmidekam weiter, „jedes an ihr erzeugte Geräusch mit großer Intensität, so daß eine für Dabeistehende durchaus unhörbare Berührung aufs lauteste ins Ohr schallt. Man gewinnt daher in der dem Trommelfell anliegenden Sonde ein Mittel, um leise und in großer Entfernung an festen Körpern erzeugte Töne und Geräusche durch eine direkte Verbindung der Sonde mit dem festen schalleitenden Körper der Gehörswahrnehmung noch zugänglich zu machen, wo alle übrigen bisher angewendeten Kunstmittel den Dienst bereits versagen."

Die Herausnahme der Sonde ist infolge Zurückfederns seitens des Trommelfelles von einem kleinen Knall begleitet. Ein solcher entsteht auch, wenn man durch eine plötzliche Luftdruckänderung im Gehörgang oder in der Pauke das Trommelfell einwärts oder nach außen drückt, und ferner, wenn man es aus einer dieser Lagen in seine Ruhestellung zurückschnellen läßt. Eine momentane Anspannung oder Entspannung durch die Binnenohrmuskeln hat den gleichen Effekt.

Zur Messung der Exkursionsgröße mechanischer Trommelfellbewegungen kann man sich eines in den Gehörgang eingesetzten Manometers bedienen. Politzer[1]) hat dieses Verfahren meines Wissens zuerst angewendet. Er befestigte ein kleines gekrümmtes, 2 bis 4 mm weites Glasröhrchen mittelst eines passend geformten, mit Talg bestrichenen Kork- oder Kautschukstückes luftdicht im Meatus und benutzte einen im Röhrchen befindlichen Tropfen gefärbter Flüssigkeit als Index für die Schwankungen. Lucae[2]) verbesserte die Methode insofern, als er mit Hilfe von erwärmtem Guttapercha einen sicherer wirkenden Verschluß des Gehörganges erzielte und wegen des geringeren spezifischen Gewichtes Äther als Manometerflüssigkeit wählte. Noch zweckmäßiger verfuhr Helmholtz[3]). Er fand es bei den von ihm gebrauchten anatomischen Präparaten vorteilhafter, den Gehörgang ganz mit Wasser zu füllen als die in demselben enthaltene Luft nur durch einen einzelnen Wassertropfen im Manometerröhrchen zu sperren. Denn ein solcher Tropfen widerstehe kleinen verschiebenden Kräften ein wenig, da er mit seinen beiden kapillaren Grenzflächen der Glaswand fest adhäriere, und bewege sich deshalb oft nicht, wo er sich bewegen solle. Habe man aber den ganzen Gehörgang mit Wasser gefüllt und dann das mit einem passenden Stopfen aus Siegellack befestigte Manometerröhrchen so eingesetzt, daß sich dabei etwas Wasser in dieses hineindrängt, so zeige dessen Oberfläche sehr genau die Verschiebungen der Membrana tympani an.

---

1) Sitzungsber. d. Wiener Akademie d. Wiss., Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 43, Abteilg. 2, 1861, S. 433.

2) Archiv f. Ohrenheilkunde, Bd. 1, S. 102ff.

3) Die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells; Pflügers Archiv f. Physiologie, Bd. 1, 1869.

Gleichzeitig hervorrufen und beobachten kann man mechanische Trommelfellbewegungen mittelst des Siegleschen pneumatischen Trichters (Fig. 1). Es ist dies ein Ohrtrichter, der vorn mit einer Glasplatte verschlossen ist und seitlich ein kleines Ansatzrohr hat. Verbindet man letzteres mit einem Gummigebläse und führt man den Trichter fest ins Ohr, so kann man in dem derart abgeschlossenen Gehörgang Luftverdichtungen und -verdünnungen erzeugen und dabei durch das Glasfenster das Trommelfell, indem man Licht darauf spiegelt, inspizieren. Lucae[1]) hat eine Modifikation dieser Vorrichtung unter dem Namen Otostroboskop beschrieben. Die Luftdruckwechsel im Gehörgang werden dabei durch eine elektromotorisch betriebene Pumpe besorgt, und die Beobachtung des Trommelfelles bzw. Hammergriffes geschieht nach dem bekannten stroboskopischen Prinzip durch eine Löcherscheibe.

Durch mechanisches Einwärts- oder Nachaußentreiben des Trommelfelles wird bekanntlich der Schalleitungsapparat des Mittelohres mehr oder weniger fixiert und die Klangwahrnehmung beeinflußt. Zum Zwecke des Studiums dieser Verhältnisse kann man gleichfalls eine Vermehrung bzw. Verminderung des Luftdruckes im äußeren Gehörgang benutzen.

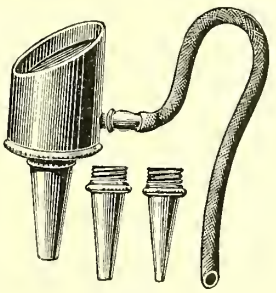


Fig. 1.

Man ziehe zum Beispiel das eine Ende eines Gummischlauches, der durch ein T-Stück mit einem Manometer kommuniziert, über eine sogenannte Ohrolive (oder -birne) und führe diese luftdicht in den Gehörgang; das andere Schlauchende wird nach Zwischenschaltung eines Absperrhahnes mit einem Druck- oder Saugapparat verbunden, als welchen man auch eventuell den eigenen Mund verwenden kann. Mit dieser Vorrichtung läßt sich nach Art des in der otiatrischen Diagnostik üblichen Gelléschen Versuches prüfen, wie es sich mit der Perzeption einer auf den Schlauch oder auf den Scheitel des Beobachters gesetzten Stimmgabel verhält, wenn 1. Drucksteigerung, 2. Druckverminderung und 3. weder das eine noch das andere im Gehörgang stattfindet. Störend ist hierbei, daß das Ohr durch das Instrumentarium verschlossen wird und daß daher die Erscheinungen, die ein solcher Verschluß an sich hervorruft, mit in die Resultate eingehen.

In dieser Hinsicht vorzuziehen sind Experimente in Caissons (Taucherglocken) oder in einem pneumatischen Kabinett. Eine Einrichtung letzterer Art haben Mach und Kessel konstruiert und in ihrer Abhandlung über „Die Funktion der Trommelhöhle und der Tuba Eustachii“[2]) folgendermaßen beschrieben. „Wir verwendeten“, heißt es daselbst, „einen hölzernen Kasten, in welchem eine Person eben bequem aufrecht stehen kann. Derselbe ist an der Außen- und Innenseite wohl mit Papier überklebt und an einer Vertikalseite mit einem Deckel, dessen Ränder mit Leder besetzt

1) Arch. f. Ohrenheilkunde, Bd. 53, S. 39ff., 1901.

2) Sitzungsber. d. Wiener Akademie d. Wiss., Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 66, Abteilg. 3, S. 330, 1872.

sind, nach Art der Windlade einer Orgel wohl verschließbar. Letzterer Deckel kann noch durch Holzschrauben fest an den Kasten angedrückt werden, so daß nahezu ein luftdichter Verschluß eintritt. Die eine Wand enthält in der Höhe des Gesichtes der eingeschlossenen Person ein Fenster und ferner an der Außenseite ein mit gefärbtem Wasser gefülltes Heberbarometer, welches durch das Fenster abgelesen werden kann. Zwei Schläuche führen aus dem Innern des Kastens zu einem saugenden und zu einem drückenden Blasebalg. Die Öffnungen dieser Schläuche können von der eingeschlossenen Person durch mit Leder überzogene Holzklappen abwechselnd gedeckt werden. Wird keine der Öffnungen gedeckt, so zirkuliert die Luft des Kastens einfach, indem sie von dem saugenden Balg aufgenommen und durch den drückenden Balg, der sie aus dem saugenden schöpft, wieder in den Kasten eingeführt wird. Deckt man die Öffnung des saugenden Balges, so tritt eine Druckerhöhung, deckt man jene des drückenden Balges, so tritt eine Druckverminderung im Kasten ein. Die eingeschlossene Person kann also durch das Spiel der Klappen abwechselnd plötzlich einen Luftdruck im Kasten hervorrufen, welcher merklich größer oder merklich kleiner ist als der äußere Luftdruck. Bei unserem Apparate erhalten wir eine Druckerhöhung von 14 cm Wasser und eine Druckverminderung von 20 cm Wasser." Die Versuche mit Orgelpfeifen, die außerhalb des Kastens angeblasen, und mit Stimmgabeln, die auf den Kasten gesetzt wurden, bestätigten das mit erhöhter Spannung des Trommelfells gewöhnlich verbundene Zurücktreten der tieferen Grundtöne zugunsten der Obertöne.

Zur Demonstration der akustischen Schwingungen des Trommelfells beim lebenden Menschen hat E. Berthold[1]) ein einfaches Verfahren angegeben. Ein gläsernes T-Rohr, etwa 5—7 mm weit, wird mit dem einen Ast an der Gasleitung befestigt; der zweite Ast wird mit Hilfe eines Siegellackpfropfens völlig gasdicht in den Gehörgang eingefügt und an der Öffnung des dritten das Gas entzündet. Je kürzer der Abstand der Flamme vom Ohre, um so besser; doch darf die Distanz auch nicht viel geringer sein als etwa 12—14 cm, sonst kann bei einer Undichtigkeit die Flamme aufs Ohr schlagen (wodurch übrigens nach Bertholds ausdrücklicher Angabe kein irgend erheblicher Schaden angerichtet wird). Die Flamme, die nur klein sein soll, wird im rotierenden Spiegel beobachtet. Von der Versuchsperson gesungene Töne oder eine zwischen die Zähne genommene klingende Stimmgabel geben besonders gute Flammenzackenbilder. Beim Valsalvaschen Versuch, sowohl beim positiven als auch, obschon weniger deutlich, beim negativen, werden die Bewegungen des Trommelfelles sichtlich schwächer.

In etwas anderer Weise als Berthold haben Nagel und Samojloff[2]) den gleichen Grundgedanken zur Ausführung gebracht. Sie machten die Paukenhöhle eines schlachtfrischen Hammelkopfes zur Gaskammer, indem sie das Gas durch einen Troicar in die Tube leiteten und von da durch

1) Optische Darstellung der durch Schalleitung durch die Kopfknochen erzeugten Bewegungen des Trommelfells am Lebenden; Monatsschr. f. Ohrenheilkunde. 6. Jahrg.; No. 3, 1872.

2) Arch. f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abteilg., 1898, S. 505ff.

einen Schlauch, der in einer künstlichen Öffnung der Bulla ossea befestigt wurde, zum Brenner gelangen ließen. Letzterer war ein Platinbrenner mit sehr feiner Öffnung, aus dem die Flamme 1 cm hoch brannte. Um diese stärker leuchtend zu machen, wurde das Gas gelegentlich über Benzin geleitet. (Noch zweckmäßiger wäre wohl die Anwendung von Azetylen gewesen.) In den äußeren Gehörgang wurde nach Entfernung der Ohrmuschel ein möglichst weites Glasrohr eingebunden. Töne, Vokale, geflüsterte Worte, durch dieses Rohr dem Trommelfell zugeleitet, hatten eine lebhafte Flammenreaktion zur Folge. Auch das Aufsetzen einer tönenden Gabel auf den Schädel rief deutliche Zackenbilder im rotierenden Spiegel hervor. Besonders betont zu werden verdient, daß die Wirkung zunahm, wenn der äußere Gehörgang verschlossen ward, daß man also mit dieser Methode auch die Erscheinungen des Weberschen Versuches objektiv demonstrieren kann. Eine Herrichtung des Präparates, die noch einfacher als die eben beschriebene ist, besteht darin, daß man eine in die Tube geführte Röhre mit einem T-Rohr verbindet, dessen einer Schenkel mit der Gasleitung kommuniziert, während der andere die Flamme speist; wobei demnach die Paukenhöhle nur eine Art seitlichen Divertikels der Gasleitung bildet.

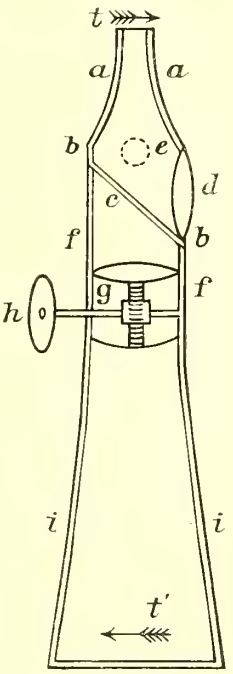


Fig. 2.

Eine mikro-stroboskopische Methode zur Beobachtung des schwingenden lebenden Trommelfelles haben Mach und Kessel[1]) ausgearbeitet. Ihr Apparat war ein eigenartiger Ohrenspiegel (Fig. 2), gewissermaßen eine Kombination des Sieglescheu Trichters mit einem Mikroskop. Das Instrument „besteht aus einem gewöhnlichen Trichter, einem um 45° gegen die Trichterachse geneigten Planspiegel *bb*, dessen Belegung bei *c* entfernt ist, und einer Linse *d*. Trichter, Planspiegel und Linse bilden mit dem Gehörgang der zu untersuchenden Person einen abgeschlossenen Raum, in welchen nur von unten ein Rohr zur Schalleinleitung einmündet, dessen Öffnung durch *e* angedeutet ist. An diesen Apparat schließt sich ein Rohr *ff* an, in welchem sich eine aplanatische Lupe *g* befindet, die durch einen Trieb *h* verschoben werden kann. An *ff* stößt noch ein leicht trichterförmig erweitertes Rohr *ii*. Selbstverständlich ist der Apparat an allen inneren, nicht optisch wirkenden Teilen geschwärzt." Das Licht einer starken Lichtquelle „fällt auf die Linse *d*, wird von dem Planspiegel *b* reflektiert und auf dem Trommelfell gesammelt. Von diesem intensiv beleuchteten Trommelfell *t*, welches mit Goldbronze leicht bestäubt ist, wird durch die Linse *g*, da es sich beiläufig in der doppelten Brennweite befindet, ein reelles verkehrtes gleichgroßes Bild bei t^1 erzeugt. Letzterem kann man mit einem Mikroskop beliebig nahe kommen. Dasselbe läßt sich daher bequemer und bei stärkeren Vergrößerungen untersuchen als das Original. Läßt man durch

1) Sitzungsber. d. Wiener Akademie, Mathem.-Naturwiss. Kl., Bd. 66, Abteilg. 3, S. 340, 1872.

die Linse d von einer Unterbrechungsgabel unterbrochenes Licht einfallen, während man eine nahe gleichgestimmte Pfeife durch e einwirken läßt, so beobachtet man an t^1 mit dem Mikroskop leicht die stroboskopische Bewegung des Trommelfells." „Sollen die Versuche am lebenden Ohre gut gelingen, so ist hierzu eine vorzügliche Fixierung des beobachteten Kopfes und der Apparate notwendig. Wir bedienen uns (sagen die Autoren hierüber) eines dreibeinigen massiven Tisches von Holz. Auf demselben steht ein schwerer eiserner Träger, welcher den Ohrenspiegel und eine Gabel für das Kinn der beobachteten Person fixiert. Vor dem Ohrenspiegel auf einem Stativ mit mehreren Trieben befindet sich das Mikroskop. Die beobachtete

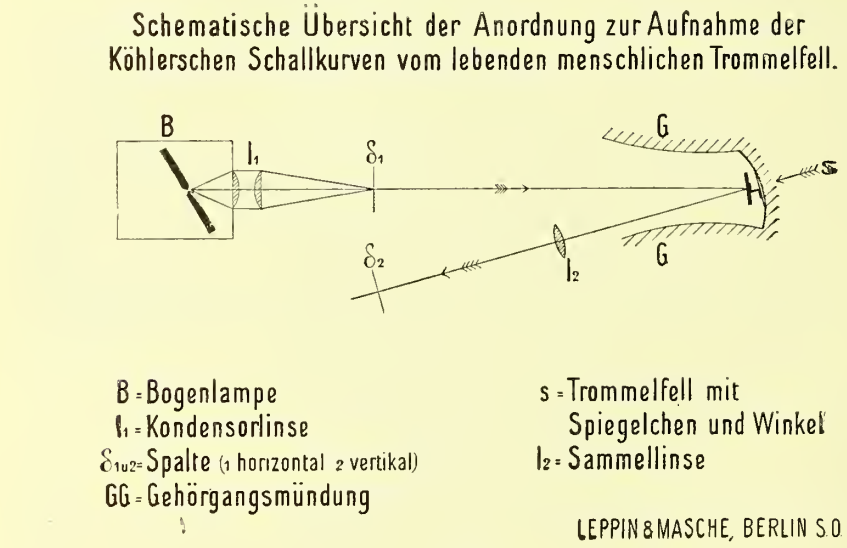


Fig. 3.

Person sitzt nun vor dem Tisch auf einem Drehstuhl und schiebt ihr Ohr über den Trichter des festgestellten Spiegels. Nachdem die passende Stellung erreicht ist, wird das Kinn durch die Gabel fixiert."

Das Trommelfell selbst zur Aufzeichnung seiner eigenen Schallbewegungen dienstbar zu machen, ist vor kurzem W. Köhler gelungen[1]). Das Prinzip seiner Versuchsanordnung veranschaulicht Fig. 3. Das Licht einer Bogenlampe B fällt, durch die Linsen l_1 konzentriert, auf einen horizontalen Spalt δ_1 und gelangt divergent von hier in den Gehörgang GG und auf ein Spiegelchen S, das, an einem kleinen Aluminiumwinkel befestigt, in passender Stellung mit Syndetikon auf das Trommelfell geklebt ist. Von S wird der Lichtstrahl reflektiert und kehrt in das Freie zurück. Nachdem eine Sammellinse l_2 das Lichtbündel konvergent gemacht hat, trifft es endlich in derjenigen Entfernung, in der die Linse l_2 das Bild des ersten —

1) Akustische Untersuchungen, I. Teil; Berliner Philos. Dissertation 1909. Auch Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 54, S. 241, 1910. — Berichte über Apparate u. Anlagen von Leppin u. Masche, Berlin SO; 7. Jahrgang, Heft 2, 1910.

horizontalen — Spaltes entwirft, auf einen senkrechten Spalt δ_2, und hinter diesem zweiten Spalt, durch den also nur ein Lichtstrahl von punktförmigem Querschnitt dringt, fährt, von einem Gewichte gezogen, die photographische Platte vorüber. Wie man sieht, müssen auf ihr Kurven entstehen, sobald das Trommelfell und mit ihm Spiegel und Lichtstrahl durch Schalleinwirkung ins Schwingen geraten. Der Firma Leppin & Masche ist die Reproduktion der im Original naturgemäß sehr schwachen Aufnahmen auf photomechanischen Wege nach Überwindung ganz erheblicher Schwierigkeiten gelungen, und sind von ihr Diapositive Köhlerscher Schallkurven käuflich zu beziehen. Fig. 4, die Abbildung einer dieser Platten, zeigt zunächst ein gesungenes „u", dann die Wiedergabe des Stimmgabeltones c^2 und endlich die Aufzeichnung des Tensorreflexes. Die letzteren Kurven zeigen deutlich, wie erst der Schall eingesetzt und dann das Trommelfell infolge des Tensorreflexes mit dem Spiegel sich geneigt und so gleichsam die Abszissenachse

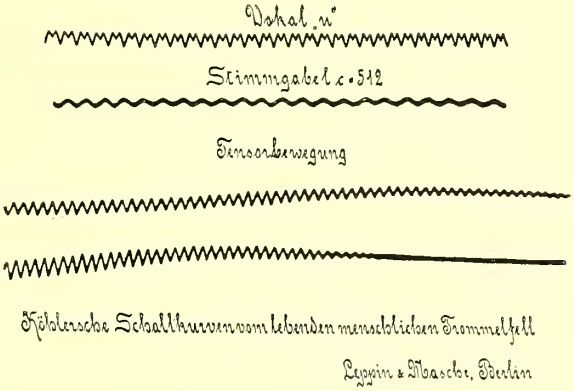


Fig. 4.

der ganzen Welle nach unten verschoben hat. (Der einwirkende Schall war in beiden Fällen der Vokal „o", von einer Männerstimme gesungen.) — Gleich Mach und Kessel ließ sich auch Köhler eine genügende Fixierung des Kopfes der Versuchsperson angelegen sein: der Unterkiefer wurde fest gegen eine Gipsform gepreßt und der Kopf außerdem noch durch eine Hinterhauptsstütze, an der ein straffer Stirnriemen befestigt war, gehalten.

Wie stets ein Teil des Schalles beim Übergange aus einem Medium in ein anderes an der Grenzfläche reflektiert wird, so wirft auch das Trommelfell, je nach dem momentanen Grade seiner Spannung, ein größeres oder geringeres Quantum des in den Gehörgang eindringenden Schalles nach außen zurück. Lucae[1]) hat hierüber an Ohrmodellen wie an toten und lebenden Tier- und Menschenohren zahlreiche Versuche angestellt. Er verwendete dazu ein nach dem Muster der Quinckeschen Interferenzvorrichtung konstruiertes „Interferenzotoskop", ein gläsernes T-Rohr, dessen vertikaler Schenkel durch einen Gummischlauch mit dem Gehörgang der Versuchsperson verbunden wird, während von der einen Öffnung des hori-

1) Archiv f. Ohrenheilk., Bd. 3, S. 186ff., 1867.

zontalen Röhrenstückes ein Schlauch zum Ohre des Beobachters führt und die andere zur Aufnahme des Tones einer Stimmgabel dient. Der mit dem Ohre der Versuchsperson kommunizierende Ast des Interferenzotoskopes, der „Interferenzschenkel", muß zusammen mit dem Gehörgang so lang gemacht werden, wie die Viertelwellenlänge des gewählten Tones ist. Dann wird, solange er offen ist, der Ton vom Beobachter infolge der Interferenz geschwächt gehört; beim Zudrücken des Interferenzschenkels dagegen schwillt der Ton entsprechend an.

2. Die Gehörknöchelchenkette.

Die normale Funktion der Knöchelchenkette besteht darin, aus der Luft oder von den Kopfknochen her das Trommelfell treffende Schallerregungen durch pumpenkolbenartige Hin- und Hergänge von entsprechender Frequenz auf das Labyrinthwasser zu übertragen. Demgemäß beziehen sich die hier in Frage kommenden physiologischen Untersuchungen einmal auf die Exkursionsfähigkeit der verschiedenen Teile des Mittelohrapparates und sodann auf Form und Amplitude seiner akustischen Schwingungen als Ganzes.

Von welcher Art, Richtung und Größe zunächst die gröberen mechanischen Bewegungen sind, die die drei Knöchelchen Hammer, Amboß und Steigbügel, sei es isoliert oder im Zusammenhang miteinander, auszuführen vermögen, ist eine Frage, die die Autoren teils durch Schlußfolgerungen aus den anatomischen Verhältnissen der Gelenke und Bänderverbindungen zu beantworten versucht haben, teils durch direkte Versuche über die Beweglichkeit der einzelnen Knöchelchen. Man kann deren Drehbarkeit und Verschieblichkeit am Präparat studieren, indem man sie mit feinen Pinzetten, Haken oder Nadeln faßt und bewegt. Oder man kann nach dem Vorgange von Politzer[1]) Glasfäden, die sich dabei besser bewähren wie etwa die Mittelrippen von Vogelfedern, als Fühlhebel an den Gehörknöchelchen befestigen, und während man das Trommelfell durch Luftdruck vom Gehörgang aus in Bewegung setzt, aus ihren Schwingungen die Drehungsachsen und Exkursionsgrößen bestimmen. Schmidekam[2]) hat dieses Verfahren eingehend nach verschiedenen Richtungen erprobt und beschrieben. Die Länge seiner Glassonden, die alle an ihrem einen Ende etwas dicker waren und am anderen einen ganz dünnen Faden bildeten, schwankte zwischen 8 und 15 cm, das Gewicht zwischen 4 und 15 mg. Ihre Befestigung, zuweilen eine richtige Geduldsprobe, geschah nach übersichtlicher Eröffnung der Paukenhöhle so, daß die betreffende Stelle des Knöchelchens mit einer heißen Nadel ausgetrocknet und alsdann sogleich der Fühlhebel mit einer Spur Siegellackes, welches an dem dicken Ende der Sonde erhitzt werden mußte, oder mittels eines besonderen Kittes (1 Teil Guttapercha, 1 Teil Wachs, 4 Teile Kolophonium) aufgesetzt wurde. Am günstigsten fand Schmidekam es, die Hammersonde längs des Griffes, die Amboßsonde in der Richtung parallel dem langen Fortsatz und die Steigbügelsonde (nach Freilegung desselben vom Labyrinth her) senkrecht oder parallel zur Fußplatte zu befestigen.

1) Wochenblatt der K. K. Gesellschaft der Ärzte in Wien, 1868, S. 14.
2) a. a. O. S. 26ff.

Helmholtz[1]) prüfte die Exkursionsfähigkeit des Steigbügels und die demselben eigentümliche Hebelbewegung, indem er die Stapesbasis mit einem von der Vorhofsseite her aufgesetzten Nadelknopf nach außen drängte oder eine feine Nähnadel in die Platte einstach und als Fühlhebel benutzte.

Mach und Kessel gingen bei ihren Untersuchungen über die Topographie und Mechanik des Mittelohres[2]) davon aus, daß durch Glashebel die Bewegungen der Knöchelchen wesentlich modifiziert würden. Sie befestigten daher, um die Drehungsachse festzustellen, auf dem betreffenden Knöchelchen mittels einer erhitzten Nadel und etwas Wachs ein kleines Stück eines versilberten Mikroskopdeckglases und ließen ein in etwa 4 m Entfernung aufgestelltes Licht sich darin spiegeln. Dann wurde die Ebene des Deckgläschens durch Drücken und Drehen so lange verschoben, bis das Lichtbild bei den Bewegungen des Knöchelchens seinerseits keine Verschiebung mehr erlitt. Ist das erreicht, so wird der Spiegel nur mehr um seine Normale gedreht, und ist letztere mithin parallel der Drehungsachse des Knöchelchens. Jedoch halten die Autoren auch dieses Verfahren nur in dem Falle für statthaft, daß die Kette durch Luftdruckänderungen im Gehörgang in Bewegung gesetzt wird. Handelt es sich aber um Schallschwingungen, so könnte man dagegen, heißt es a. a. O., „immer noch Bedenken haben. Es ist zwar nicht zu besorgen, daß das etwa 4 qmm haltende dünne Spiegelchen durch sein Gewicht das Gehörknöchelchen zur Seite zieht, wie dies die Glassonden tun, allein bei der geringen Masse des Knöchelchens wird das Trägheitsellipsoid desselben dadurch nicht unbeträchtlich abgeändert, es könnte sozusagen eine Abstimmung für eine andere Achse erfolgen." Mach und Kessel bestäubten deswegen zwecks Beobachtung bei Schallbewegungen das betreffende Knöchelchen mit Goldbronze, wobei die Goldpunkte während der Vibrationen zu kurzen Linien ausgezogen werden. Durch mikroskopische Beobachtung zweier solcher Punkte, z. B. am Amboß, welche Schwingungslinien von merklich verschiedener Lage zeigten, und durch Winkelmessungen mittels des Lesonschen Doppelspathgoniometers wurde dann die Richtung der Drehungsachse bestimmt.

Die Form der mechanischen Bewegung der Knöchelchenkette als Ganzes kann man wahrnehmen, wenn man in einem Präparat Pauke und Labyrinth von oben her eröffnet und in dem unversehrten Gehörgang die Luft komprimiert; insbesondere ist dabei auch die Bewegung des Steigbügels beim Hineinblicken von oben in die Trommelhöhle sichtbar. Die Bewegungen, die die Membran des runden Fensters bei Luftverdichtungen und -verdünnungen in der geschlossenen Paukenhöhle ausführt, hat Weber-Liel[3]) beobachtet. Er legte die Fenestra rotunda von hinten und unten her frei und verschloß darauf die in der Pauke angebrachte Öffnung wieder luftdicht durch Aufkitten eines Deckgläschens. Dann konnte er, während mittels eines Paukenhöhlenkatheters die Luft in der Trommel abwechselnd verdünnt und verdichtet wurde, direkt sehen, wie die Membran korrespondierende, sehr ausgiebige In- und Exkursionen machte.

1) Mechanik der Gehörknöchelchen; Pflügers Arch. Bd. 1, 1869; § 5.

2) Sitzungsber. d. K. Akademie d. Wissensch. zu Wien, Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 69, Abteilg. 3, S. 221 ff., 1874.

3) Monatsschrift f. Ohrenheilkunde 1876.

Ein weiteres Mittel, um die Einwärts- und Auswärtsbewegungen des Mittelohrapparates zu demonstrieren und zugleich ihre Größe zu bestimmen, bietet die manometrische Methode. Vom Gehörgangsmanometer war bereits die Rede. Man kann aber ein solches natürlich auch sozusagen am anderen Ende der Kette anbringen. Politzer[1]) hat dies zuerst getan. Er entblößte den hinteren Abschnitt der oberen Fläche des Felsenbeins von der Dura, so daß der obere Halbzirkelkanal deutlich als vorspringender Bogen freilag. Darauf wurde dessen höchste Partie mit einer scharfen Zange entfernt und in die Öffnung des Bogenganges ein kleines, ebenso weites, bis zu $^2/_3$ mit Karminlösung gefülltes Manometerröhrchen, dessen unteres Ende dem Kanal entsprechend gekrümmt war, mittels Harzkittes luftdicht eingesetzt. Auch in dem Rahmen des runden Fensters kann man in ähnlicher Weise ein Manometerchen anbringen. Wie man aus dem Ausschlag der Manometerflüssigkeit die Größe der Verschiebung des Mittelohrapparates berechnen kann, möge folgendes Beispiel zeigen, das der oben erwähnten Abhandlung von Helmholtz über die Mechanik der Gehörknöchelchen und des Trommelfells entnommen ist[2]): „An einem ... Präparat war nach dem Vorgange von Politzer ... der obere Bogengang des Labyrinths von der oberen Seite des Schläfenbeins her geöffnet und ein dünn ausgezogenes Glasröhrchen eingesetzt worden, dessen Querschnitt durch Kalibrierung mit Quecksilber gleich 0,228 Quadratmillimeter gefunden war. Der Vorhof und ein Teil des Röhrchens waren mit Wasser gefüllt. Bewegungen der Gehörknöchelchen, durch Eintreiben von Luft in den äußeren Gehörgang hervorgerufen, bewirkten, daß die Flüssigkeit in jenem Röhrchen um 0,9 mm stieg. Da nun die Durchmesser der Fenestra ovalis sich fanden gleich 1,2 und 3 mm, so ist die Fläche der Fenestra ovalis etwa 12,4mal so groß als der Querschnitt des Glasröhrchens. Die mittlere Exkursionsweite der Steigbügelbasis muß also $\frac{1}{12{,}4}$ von der der Flüssigkeit im Röhrchen sein, was 0,0726 mm ergibt."

Die akustischen Schwingungen des Mittelohrapparates haben zuerst und fast gleichzeitig Politzer[3]) und Lucae[4]) demonstriert. Ersterer entfernte an dem Gehörorgane einer möglichst frischen menschlichen Leiche das Tegmen tympani, legte das Hammer-Amboßgelenk frei und kittete auf den Hammerkopf einen dünnen, ca. 12 cm langen Glasfaden oder Strohhalm, an dessen oberem Ende die Faser einer Federfahne so befestigt wurde, daß sie die Bewegungen des Fühlhebels auf ein Kymographion in bekannter Weise aufzeichnen konnte. Der Modus der Schallzuleitung war, da es auf möglichst kräftige Bewegung ankam, folgender. Als Tonquelle diente eine Orgelpfeife oder eine Gabel auf Resonanzkasten. Ein auf sie abgestimmter Helmholtzscher Resonator wurde mit einem Gummischlauch in Verbindung gebracht und dieser luftdicht in den wohlgereinigten Gehörgang eingeführt. Die vom Fühlhebel — man kann denselben auch am Amboß anbringen oder

1) Sitzungsberichte d. Wiener Akademie, Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 43, Abteilg. 2, S. 427ff., 1861.

2) S. 35.

3) Archiv f. Ohrenheilk. Bd. 1, S. 59ff., 1864.

4) Ebenda, S. 303.

an der Stapesplatte, was freilich Politzer nur am Entenkopf glückte — gezeichneten Kurven lassen die Tonwellen, auch Schwebungen und Klangperioden vorzüglich deutlich erkennen. Lucae erhielt ganz ähnliche graphische Resultate, wenn er die Tonquelle nicht durch Luftleitung, sondern durch Kopfknochenleitung auf das Ohr wirken ließ.

Auch Schmidekam[1]) hat die Vibrationen von Glassonden, die auf die Gehörknöchelchen gekittet waren, während der Zuleitung der starken Töne einer Sirene beobachtet. So interessant aber an sich seine Angaben über die Eigentümlichkeiten der Schwingungsformen dieser Sonden sind, soll hier doch nicht näher darauf eingegangen werden, weil die Belastung mit Hebeln nachweislich die Bewegungen der Kette störend beeinflußt.

Aus diesem Grunde verfuhr Buck[2]), der unter Leitung von Helmholtz arbeitete, in nachstehender Weise. Das Dach der Trommelhöhle von möglichst frischen, in sehr schwacher, etwa 10prozentiger Alkohollösung aufbewahrten Gehörorganen wurde so weit weggenommen, daß man mit einem Mikroskop Hammer, Amboß und Stapeskopf sowohl von oben als auch von der Seite bequem betrachten konnte. „Zur Beleuchtung genügte eine gewöhnliche Lampe, deren Strahlen vermittelst einer Linse auf die zu beobachtende Stelle konzentriert wurden. Diese Stelle wurde erst mit einem heißen Draht abgetrocknet und dann mit Amylumpulver bestreut. Amylumkörperchen reflektieren ein starkes Licht zur Genüge, so daß man schon bei einer 24fachen Vergrößerung die einzelnen Körnchen als scharf konturierte glänzende Punkte erkennen kann oder bei rascher Bewegung als glänzende Linien. Im weiteren Verlauf der Beobachtung stellte sich der Gebrauch von Amylum als überflüssig heraus, da schon die Feuchtigkeit der Teile eine genügende Anzahl von glänzenden Punkten darbot.“ Als Schallquellen dienten gedeckte Orgelpfeifen von tiefer und mittlerer Tonhöhe; ein Gummischlauch übertrug den Ton von einer in der Mitte des Deckels befindlichen Öffnung in den Gehörgang. Buck gibt in seiner Abhandlung sehr hübsche Abbildungen von der Richtung der verschiedenen glänzenden Schwingungslinien, die sich im Mikroskop zeigten und die auch gemessen sowie zur Bestimmung der Rotationsachsen der Knöchelchen verwertet wurden. Die Exkursionen der Membran des runden Fensters und der Stapesplatte (letztere vom Vorhof aus) ließen sich gleichfalls nach dieser Methode beobachten. Die Freilegung der Membrana tympani secundaria zum Zwecke derartiger Versuche geschieht nach Burnett[3]) am besten so, daß der Boden der Trommelhöhle bis zur Höhe des Fensters entfernt wird, wobei man sich vor Verletzungen des hinteren unteren Bogenganges hüten muß. Dann bringe man das Präparat derart in einen Schraubstock, daß man die Knöchelchenkette gerade von unten und die Fenstermembran in einem Winkel von 45° durch das Mikroskop sehen kann.

Mach und Kessel[4]) haben die so vielseitig verwendbbare Stroboskopie auch für das Studium der Schallschwingungen des Mittelohrapparates be-

1) a. a. O. S. 26ff.

2) Archiv f. Augen- u. Ohrenheilk. Bd. 1, Abteilg. 2, S. 121ff., 1870.

3) Archiv f. Augen- u. Ohrenheilk. Bd. 2, 2. Abteilg., S. 64ff., 1872.

4) Sitzungsberichte d. Wiener Akademie, Mathem.-Naturwiss. Kl., Bd. 69, Abteilg. 3, S. 236, 1874.

nutzt. Durch einen Spaltschirm, der an der Zinke einer elektrischen Gabel von 256 Schwingungen befestigt war, wurde ein heller Lichtstrahl auf eine Linse geworfen und von dieser auf das unter dem Mikroskop befindliche Präparat, nämlich auf die mit Goldbronze bestäubten Gehörknöchelchen oder das runde Fenster, konzentriert, während gleichzeitig der Ton einer Pfeife von nahezu ebenfalls 256 Schwingungen durch einen Schlauch dem Trommelfell zugeleitet ward. Durch Stimmen der Pfeife kann man hierbei beliebig langsame Schwebungen zwischen Pfeife und Gabel und damit eine beliebig langsame stroboskopische Bewegung des Beobachtungsobjektes erzielen. Richtet man die Versuchsanordnung so ein, daß das Licht durch den Spalt hindurch immer nur dann, wenn die Zinke der Gabel die Gleichgewichtslage passiert, zum Präparate zugelassen wird, so tritt dies bei jeder Schwingung zweimal ein. Dann erscheint der schwingende Teil des Präparates doppelt, oder genauer, man sieht stets zwei um eine halbe Schwingung differente Phasen gleichzeitig; dieser Modus ist vorteilhaft, wenn man die äußersten Lagen nebeneinander betrachten will. Macht man dagegen die Einstellung so, daß jedesmal beim Exkursionsmaximum der Gabel der Lichteinlaß stattfindet, so erscheinen die schwingenden Teile einfach. Auf diese Weise kann man, wie es denn auch Mach und Kessel getan haben, die Bewegungsformen des von Tönen oder auch von Klängen in Vibration versetzten Mittelohrapparates genau verfolgen und selbst Messungen der Exkursionsgrößen mittelst des Okularmikrometers anstellen. Nur darf man nicht Töne mit zu hohen Schwingungszahlen nehmen, da sich dann die Bewegungen bald bis zur Unsichtbarkeit verkleinern.

Nicht unerwähnt bleibe, daß W. Köhler bei seiner oben angeführten Untersuchung[1]) es gleichfalls unternommen hat, aus den Trommelfellkurven den Ausschlag der Hammergriffspitze bei Schallschwingungen zu ermitteln, und daß auch er angibt, mit der Gewinnung eben dieser Kurven über c^1 nicht recht hinausgekommen zu sein.

3. Die Binnenohrmuskeln.

Die Untersuchungen, welche der physiologischen Funktion des Musculus tensor tympani, des Trommelfellspanners, gelten, lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine sucht die Veränderungen, welche die einzelnen Teile des Schalleitungsapparates hinsichtlich ihrer gegenseitigen Lage, ihrer Spannung und Beweglichkeit durch eine Tensorkontraktion erfahren, als solche zu ermitteln; die andere beschäftigt sich mit dem akustischen Effekt der in Rede stehenden Muskelwirkung. Einige Methoden ermöglichen es, beide Ziele gleichzeitig anzustreben.

Politzer[2]) trennte, um die Innervation und Funktion des Tensors zu studieren, einem eben getöteten Hunde den Kopf ab, eröffnete die Trommelhöhle so weit, daß alle Gebilde im Innern derselben deutlich zutage traten, und reizte nach Herausnahme des Gehirns den Trigeminusstumpf an der Schädelbasis elektrisch mit schwachen Strömen. Bei unverletztem Trommel-

1) S. 26 u. 27.

2) Sitzungsber. d. Wiener Akademie, Mathem.-Naturw. Kl., Bd. 43, Abteilg. 2, 1861, S. 427ff.

fell sah er nur wenig von der Hammerbewegung. Dagegen machte der frei präparierte Hammergriff auf Reizung des Trigeminus Exkursionen von 0,5 bis 1 mm [1]); nach Ausführung der Tenotomie blieb er unbeweglich, auch wenn der Muskel sich kräftig zusammenzog.

Um das Mitgehen der ganzen Kette zu demonstrieren, entwarf Politzer ein Lichtbildchen auf das Amboß-Steigbügelgelenk, welches sich dann bei der Tensorerregung nach innen, in der Richtung des runden Fensters, verschob. Zu dem gleichen Zwecke läßt sich natürlich auch ein Manometer benutzen, das nach früher beschriebener Weise entweder im Gehörgang oder im Labyrinth oder in der Pauke angebracht wird. Im letzteren Falle legte Politzer für das Röhrchen eine besondere Öffnung an, in der es eingekittet wurde, und verstopfte die Tube durch einen Glaspfropfen. Die Bewegung, welche die Labyrinthflüssigkeit infolge einer Tensorzusammenziehung macht, kann man übrigens auch ohne Manometer direkt mit der Lupe beobachten, wenn man einen Bogengang oder die Scala vestibuli in geringer Ausdehnung eröffnet und, wie Politzer empfiehlt, etwas Karminlösung einfließen läßt. Daß auch das Einwärtsrücken der vom Vorhof aus freigelegten Stapesplatte als Indikator der Tensorwirkung verwendbar ist, bedarf wohl kaum der besonderen Hervorhebung.

Will oder muß man auf die Anspannung der Tensorsehne durch Kontraktion des Muskels selbst verzichten, so liegt es nahe, ihn durch den Zug eines mit Gewichten belasteten Fadens zu ersetzen, und dieser Ausweg ist denn auch von verschiedenen Autoren gewählt worden. Man nimmt die Decke der Paukenhöhle weg, präpariert den Tensor aus seiner Rinne heraus und umschlingt ihn mit einem Faden. Dann wird er wieder in die Rinne, die zur Führung dient, zurückgebracht, der Faden aber über eine Rolle geleitet und mit einem Haken zur Befestigung von Gewichten versehen. Zieht man an dem Faden, so läßt sich konstatieren, wie der Hammerkopf nach außen geht und die Beweglichkeit der Knöchelchenkette sehr vermindert wird.

Um den Tensoreffekt sozusagen vom Trommelfell abzulesen, kann man beim lebenden Menschen zunächst die unmittelbare otoskopische Inspektion benutzen. Ostmann [2]) gibt an, daß die Tensorkontraktion sich dabei als eine blitzschnelle, äußerst feine, über den Hammergriff und die angrenzenden Trommelfellpartien hinweghuschende Bewegung darstelle; sie werde besonders leicht ausgelöst durch unangenehme, starke, erst tief einsetzende und dann rasch die Tonskala hinauflaufende Geräusche. Auch das früher geschilderte Verfahren Bertholds, den Gehörgang in eine Gaskammer zu verwandeln und die Trommelfellbewegungen durch Flammenbilder sichtbar zu machen, dürfte in Betracht kommen. Ganz besonders aber bewährt sich hier wieder die ebenfalls schon erörterte Köhlersche Anwendung des Trommelfellspiegels. Köhler konnte bei seinen Versuchen fünf verschie-

1) Hammerschlag (Sitzungsberichte der Wiener Akademie, Math.-Naturw. Kl., Bd. 108, Abteilg. 3, 1899) trennte den Hammer bei seinen Versuchen an jungen Hunden und Katzen gänzlich vom Trommelfell und Amboß ab, so daß derselbe schließlich wagerecht an der gut sichtbaren Tensorsehne hing, und fand alsdann die Tensorzuckungen auf akustische Reize sehr ausgiebig.

2) Arch. f. Anatomie u. Physiologie, Physiol. Abteilg., 1898, S. 75ff.

dene Arten von Bewegungen des aus dem Ohre reflektierten Spaltbildes unterscheiden. Die eine Art ließ sich auf die gelegentlich vorkommenden Kopfbewegungen zurückführen, die zweite auf das Schlucken, wobei der Reflex eine lange Schleife nach unten beschreibt. Die dritte stammt nachweislich vom Puls. Die vierte und fünfte sind Reaktionen des Bildes auf akustische Einwirkungen: es wechselt seine Lage sofort nach Einsetzen des Schalles und es verbreitert sich, letzteres wegen der Hammeroszillationen, ersteres infolge der Reflexbewegung des Tensors, deren tetanische Natur Köhler unzweifelhaft sicherstellen konnte.

Will man beim lebenden Tiere, am besten wohl beim Hunde, den Einfluß der Tensorkontraktion auf das Trommelfell untersuchen, so entfernt man zunächst den äußeren Gehörgang und legt das Trommelfell frei. Dann kann man wie Bockendahl[1]) eine Nadel, die zweckmäßig statt der Spitze ein feingeschliffenes, meißelförmiges Ende hat und ca. 2 cm lang ist, von außen in den Körper des Hammers einbohren und bei Schallzuleitung ihre Ausschläge durch ein Hornhautmikroskop beobachten. Dieses Verfahren hat gewiß seine Vorzüge vor dem Einspießen der Nadel in den Muskelbauch des Tensors nach dem Beispiele von Hensen und von Pollak, indessen ist es umständlich, mißlingt öfter und stört durch die Belastung des Hammers sowie durch schwer vermeidliche Nebenverletzungen einigermaßen die natürlichen Verhältnisse. Ostmann[2]) wandte daher mit Recht lieber eine rein optische Methode an. Er betupfte den Hammergriff, die Mitte des vorderen und die Mitte des hinteren Trommelfellsegmentes mit Ruß und betrachtete die Verschiebungen dieser schwarzen Punkte bei hellem, durch zwei Hohlspiegel reflektiertem Lichte unter vierfacher Lupenvergrößerung. Allerdings sah er deutliche Trommelfellbewegungen nur bei Zug an der Tensorsehne oder Trigeminusreizung, während die Reaktionen auf Schall beim lebenden Tiere, selbst nach Strychnineinspritzung, undeutlich beziehungsweise gänzlich gleich Null waren.

Eine sozusagen indirekte Methode zum Studium der Tensorfunktion stellt die Durchschneidung seiner Sehne, die Tenotomie, dar. Man kann die mechanische Beweglichkeit, die das Trommelfell vor und nach derselben besitzt, manometrisch vergleichen oder den Einfluß dieser Operation auf die mechanischen wie auf die akustischen Exkursionen der Knöchelchenkette durch deren Inspektion am Präparat prüfen. Auch in der Ohrenheilkunde wird die Tenotomie gelegentlich zu therapeutischen Zwecken ausgeführt und dadurch Gelegenheit gegeben zur Ermittelung der Veränderungen, die die Tonperzeption durch den Fortfall der hemmenden und spannenden Eigenschaften des Tensors erfährt.

Was überhaupt die akustisch-perzeptive Seite der Tensorphysiologie anlangt, so möge hier zunächst gleich das Gegenstück der Tenotomie beim lebenden Menschen, nämlich die willkürliche Kontraktion des Trommelfellspanners erörtert werden. Allerdings sind nur vereinzelte Personen dazu befähigt, die imstande sind, ihr Gaumensegel willkürlich zu heben, wobei die Tensorzusammenziehung als Mitbewegung einzutreten pflegt.

1) Arch. f. Ohrenheilk. Bd. 16, S. 241ff., 1880. — Auch Kieler Dissertation 1880.
2) a. a. O.

Das bei diesem Vorgang meistens hörbar werdende Knacken im Ohre ist auf die Tubeneröffnung durch den Tensor veli zurückzuführen. Schapringer[1]) hat angegeben, daß er die Tensorkontraktion und die Gaumensegelhebung getrennt ausführen könne; im ersteren Falle mache der Flüssigkeitstropfen eines Manometers im Gehörgang eine deutliche Inkursion, im letzteren bleibe diese aus, während dafür das Knacken auftrete. Ich selbst höre beim absichtlichen Emporziehen des Gaumensegels auch in der Regel das Tubenknacken beiderseits; zuweilen entsteht es aber nur einseitig oder bleibt völlig aus. Alsdann vernehme ich ein verhältnismäßig tiefes, weiches Geräusch von fast flatterndem Charakter, welches ich auf die ruckende Trommelfellbewegung beziehe. Schapringers Angabe, daß die Tensorkontraktion bei ihm mit starken Geräuschen verbunden sei, kann ich nicht bestätigen. Dagegen höre ich solche bei festem Schlusse der Augenlider und möchte sie darum auf eine Mitbewegung des Stapedius zurückführen[2]). — Den Einfluß der Tensorkontraktion auf die subjektive Tonperzeption untersucht man nach dem Beispiele Schapringers so, daß man Töne aus allen Oktaven, darunter namentlich auch obertonreiche, erstens in Luftleitung und zweitens bei Knochenleitung auf ihre Intensitäts- und Klangfarbenveränderung prüft. Will man andererseits feststellen, wie die Anspannung des Trommelfells objektiv auf die aus dem Ohre der Versuchsperson nach außen abfließenden Töne zwischen die Zähne genommener Stimmgabeln einwirkt — Schapringer drückte bei seinen Versuchen über die Knochenleitung die Zähne gegen eine Bernsteinsche elektrisch schwingende Feder —, so läßt man das Ohr durch einen zweiten Beobachter mittelst Gummischlauches auskultieren oder man könnte auch wohl die Anwendung des Bertholdschen Gaskammerverfahrens probieren.

Am Präparat fanden Mach und Kessel[3]), als sie die durch einen Ton von 128 Doppelschwingungen hervorgerufenen Vibrationen des mit Goldbronze bestäubten Hammerkopfes mikroskopisch beobachteten, daß dieselben durch Belastung des den Tensor ersetzenden Fadens mit einem Gewichte von 3 g auf etwa die Hälfte der Exkursionsweite verringert wurden, daß dagegen bei Zuleitung eines Orgelpfeifentones von 512 Doppelschwingungen zum Gehörgang des Präparates die gleiche Spannung der Tensorsehne viel weniger wirksam war; die Messung der Linien, zu denen die Goldpunkte bei den Tonschwingungen der Kette ausgezogen wurden, geschah dabei mittelst Okularmikrometers. — Buck hat seine vorhin besprochenen Versuche und Messungen vergleichender Weise vor und nach der Durchschneidung der Tensorsehne (wie auch der des Stapedius) ausgeführt, ohne übrigens einen Unterschied im Resultat zu erhalten. — Politzer[4]) konnte feststellen, daß der auf den Hammergriff gekittete Fühlhebel, welcher mit dem Tone c^1 lebhaft mitvibrierte, auffallend kleinere Ausschläge machte, sobald der Trigeminus in der Schädelhöhle gereizt wurde, „so zwar, daß, wenn beispiels-

1) Sitzungsber. d. Wiener Akademie, Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 62, Abteilg. 2, 1870.

2) Näheres hierüber in meiner Abhandlung: Die subjektiven Töne und Geräusche; Verhandlg. d. Deutschen Otolog. Gesellsch. 1909.

3) Sitzungsber. d. Wiener Akademie, Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 66, Abteilg. 3, S. 337ff., 1872.

4) Archiv f. Ohrenheilk. Bd. 1, S. 69, 1864.

weise die Größe der Exkursion des schwingenden Federchens drei Linien betrug, dieselbe auf beiläufig eine Linie vermindert wurde". Ebenso deutlich zeigte sich dieser Effekt der Trigeminuserregung, wenn Politzer die Spitze des Fühlhebels ihre Kurve auf das Kymographion aufzeichnen ließ. — Lucae[1]) erhielt ganz ähnliche Ergebnisse bei Anspannung der Tensorsehne während der Schallzuleitung durch die Kopfknochen.

Den objektiven Einfluß, den die größere oder geringere Fixierung des Trommelfells durch Tensorzug auf die Übertragung von Tönen ausübt, hat man auch durch Auskultation am Präparat untersucht. Man ist dabei teils so vorgegangen, daß man den Ton in den Gehörgang eindringen ließ und die durch ein Glasröhrchen klaffend gemachte Tube mittelst eines Schlauches mit dem Ohre des Beobachters verband oder wohl auch den Schlauch in eine mit dem Trepan angelegte Öffnung der Trommelhöhle kittete, teils so, daß man Pauke oder Gehörgang auskultierte, indes eine tongebende Stimmgabel auf dem Knochen des Präparates, etwa auf dem Türkensattel, ruhte (Politzer[2])).

Bezüglich des Musculus stapedius ist in dem vorliegenden Zusammenhange nur wenig zu sagen, nicht sowohl wegen der gewissen Vernachlässigung, die demselben im Vergleich mit dem Tensor seitens der Physiologen und Ohrenärzte zuteil geworden ist, als vielmehr deshalb, weil alles hier soeben vom Trommelfellspanner Berichtete mutatis mutandis auch vom Steigbügelmuskel gilt. Er läßt sich durch Reizung seines Nerven, des Facialis, in der Schädelhöhle zur Kontraktion bringen oder durch einen mit Gewichten gespannten Faden ersetzen, und auch die Tenotomie ist auf ihn zum Zwecke des Studiums seiner Funktion ebensogut anwendbar wie bei seinem Antagonisten. Im einen wie im anderen Falle kann man sich zur Ermittelung des mechanischen beziehungsweise akustischen Effektes der Manometrie[3]), der Inspektion des Trommelfells[4]) oder der Knöchelchenkette[5]), der Auskultation, kurz der im vorhergehenden geschilderten Methoden bedienen.

Erscheint es darum überflüssig, auf diese Dinge hier nochmals näher einzugehen, so ist es doch andererseits, mit Rücksicht auf die besonderen anatomischen Verhältnisse des Stapedius, vielleicht nützlich, die von Mach und Kessel[5]) beschriebene Methode der Präparation des Muskels und der Befestigung seiner Sehne an einem Faden wiederzugeben. Die Autoren sagen darüber: „Um den Steigbügelmuskel zu erreichen und Einsicht von vorn und unten in die Trommelhöhle zu gewinnen, bricht man den karotischen Kanal auf und nimmt von seiner hintern obern Wand und der Fossa jugularis diejenige Knochenpartie weg, welche zwischen dem untern Trommelfellrand und dem Promontorium liegt. Darauf sägt man den Processus mastoideus ab und sucht vom Fallopischen Kanal aus den Kanal des Steig-

1) Archiv f. Ohrenheilk. Bd. 1, S. 311, 1864.
2) Ebenda, S. 326.
3) Bezold, Arch. f. Ohrenheilk. Bd. 16, S. 27 u. 33; 1880.
4) Ostmann, Arch. f. Anatomie u. Physiologie, Physiolog. Abteilg., S. 546 ff., 1899.
5) Politzer, Wiener Sitzungsber., Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 43, Abteilg. 2, 1861. — Mach und Kessel, ebenda, Bd. 66, Abteilg. 3, S. 337 f., 1872 und Bd. 69, Abteilg. 3, S. 235, 1874. — Buck, a. a. O.

bügelmuskels auf. Nun wird ein dünner Seidenfaden in eine feine und kurze Nähnadel eingeführt und durch den Kanal hindurch um das Steigbügelköpfchen herum zum Kanal zurückgeführt. Der freie Teil der Sehne des Muskels gibt dem Faden Stütze und Richtung. Der Faden wird nun über eine Rolle geführt und zum Belasten eingerichtet. Entfernt man noch von der hintern Wand mit Schonung des Muskelkanals, der zur Führung notwendig ist, ein kleines Stück, so wird auch das runde Fenster mit seiner Membran bei geeigneter Stellung des Präparates dem Mikroskop zugänglich."

4. Die Paukenhöhle als Luftraum und die Tuba Eustachii.

Das Trommelfell muß, wenn es mit voller Freiheit schwingen soll, auf beiden Seiten von Luft gleichen Druckes umgeben sein. Eine Luftdruckdifferenz bildet ein mehr oder weniger beträchtliches Hindernis seiner Beweglichkeit, woraus die Forderung resultiert, daß die Tube imstande sein muß, sich von Zeit zu Zeit der Lüftung und des Druckausgleiches wegen öffnen zu können. Der Hohlraum der Pauke darf ferner hinsichtlich seiner Größe nicht unter eine gewisse Grenze hinabgehen, da dann schon durch kleine Trommelfellexkursionen bedeutende Expansivkräfte der eingeschlossenen Luft geweckt werden, die die Schwingungsamplitude zu verringern streben, ein Umstand, der namentlich für die relativ großen Ausschläge bei tiefen Tönen ins Gewicht fällt. Drittens ist zur Erreichung des größten Nutzeffektes einer in Luftleitung das Ohr treffenden Schallwelle erforderlich, daß das Trommelfell derselben nur von einer Seite her zugänglich sei, weil sonst die von beiden Seiten gleichzeitig und in mehr oder weniger genau gleicher Phase eintreffenden Verdichtungen bzw. Verdünnungen sich gegenseitig beeinträchtigen würden. Die Tube muß deswegen für gewöhnlich geschlossen sein.

Mach und Kessel[1]) haben das Verdienst, diese drei Postulate im Zusammenhang aus den vom physikalischen Standpunkt betrachteten anatomischen Verhältnissen des Mittelrohrs präzise abgeleitet und experimentell bestens begründet zu haben. Mit Hilfe ihres pneumatischen Kastens[2]), von dem bereits ausführlich die Rede war, überzeugten sie sich davon, daß man bei den Druckschwankungen innerhalb desselben deutlich fühlt, wie das Trommelfell abwechselnd einwärts und auswärts getrieben wird, was den Schluß der Tube beweist. Für die größten im Kasten herstellbaren Druckdifferenzen war bei Mach die Tube schwach durchgängig, insofern die Trommelfelle auch bei fortbestehendem Druckunterschied langsam in ihre natürliche Lage zurückkehrten. Schlucken brachte stets, wie zu erwarten, momentanen Ausgleich und damit das Verschwinden des Spannungsgefühls zu Wege.

Ferner eröffneten die beiden Autoren am Präparat die Trommelhöhle durch Hinwegnahme ihrer Decke und leiteten den Schall durch ein Gabelrohr von gleich langen und gleich weiten Zweigen aus dem Knoten einer

1) Sitzungsberichte d. Wiener Akademie, Math.-Naturwiss. Kl., Bd. 66, Abteilg. 3, S. 329ff., 1872.

2) Ähnliche Beobachtungen sind übrigens öfter in Taucherglocken angestellt worden; z. B. schon von Toynbee, Proceedings of the Royal Society, London 1853.

Pfeife einerseits in den Gehörgang, andererseits in die Pauke; letzteres, indem sie das Rohr seitlich durch einen luftdicht über dem Loche im Tegmen tympani angebrachten, in der Mitte eine Glasplatte enthaltenden Deckel führten. Durch das Glasfensterchen wurde Licht auf die mit Goldbronze bestäubten Gehörknöchelchen gespiegelt und zugleich die Bewegung der Kette mikroskopisch beobachtet. Bei Schallzufluß auf beiden Wegen blieben die Knöchelchen ruhig; sie gerieten aber in starke Schwingungen, wenn ein Ast des Gabelrohrs abgesperrt war. Wie schon hervorgehoben wurde, müssen für diesen Versuch beide Zuleitungsröhren gleich weit sein, da im anderen Falle Täuschungen unterlaufen können.

Die Annahme, daß die Forderung genügender Größe des Paukenhöhlenraumes wenigstens zum Teil durch die Kommunikation mit den Zellen des Warzenfortsatzes erfüllt werde, hat Kessel veranlaßt, sich noch besonders von der Ausgiebigkeit dieser Kommunikation zu überzeugen. Er machte durch Anbohren des Processus mastoideus von außen und Einsetzen eines T-Röhrchens in bekannter Weise die Cellulae mastoideae zur Gaskammer und konstatierte, daß man bei zugedrückter Tube und perforiertem Trommelfell durch Hineinblasen in den Gehörgang die Flamme zum Verlöschen bringen kann.

Entsteht in der Paukenhöhle eine Luftverdichtung, so sucht der Überdruck das Trommelfell nebst der mit diesem zusammenhängenden Knöchelchenkette nach auswärts, das runde Fenster aber einwärts zu pressen, während die Stapesplatte den Antrieb zu einer Bewegung erhält, die den beiden anderen der Richtung nach entgegengesetzt ist. Dasselbe, nur in umgekehrtem Sinne, findet bei einer Luftverdünnung statt. Die Erzeugung eines solchen Über- oder Unterdruckes ist sehr einfach. Ein Röhrchen wird in eine künstliche Öffnung der Pauke eingekittet oder durch die Tube geführt und mit einem Gebläse verbunden, welches auch zum Saugen zu benutzen und zweckmäßigerweise noch mit einem Manometer kombiniert ist. Den Effekt einer Druckänderung in der Trommelhöhle kann man durch Inspektion des Trommelfells, der Knöchelchenkette oder der Stapesplatte, mittelst des Gehörgangsmanometers und mit dem Labyrinthmanometer studieren. Die Beobachtung der Gehörknöchelchen muß in diesem Falle selbstverständlich bei luftdicht geschlossener Pauke, also durch ein Fenster geschehen, weshalb Politzer[1]) und Lucae[2]) über die Fühlhebel, die sie bei Versuchen der in Rede stehenden Art auf dem Hammerkopf bzw. am Amboßsteigbügelgelenk befestigt hatten, Reagenzgläschen stülpten und diese an der Paukenhöhlenwand festkitteten.

Da, wie gesagt, der Luftdruck in der Pauke in drei wirksame Komponenten zerfällt, deren eine den anderen entgegengesetzt ist, wird man sich nicht begnügen, nur die Gesamtwirkung auf die Kette festzustellen, sondern außerdem den Effekt prüfen, den eine Druckschwankung in der Pauke nach Durchtrennung der Kette (und eventuell auch der Binnenmuskelsehnen), also nach Isolierung des Trommelfells, einerseits auf dieses, andererseits auf die beiden Fenster hat. Um auch letztere noch voneinander zu trennen,

1) Arch. f. Ohrenheilk., Bd. 1, S. 72, 1864.
2) Ebenda, Bd. 4, S. 36f., 1869.

hat Bezold[1]) — welcher übrigens der erste war, der nachdrücklich Gewicht darauf legte, bei Messungen der Exkursionen des Mittelohrapparates Einwärts- und Auswärtsbewegung für sich zu betrachten — folgendes Verfahren eingeschlagen. Er sägte die Paukenhöhlenwand des Labyrinthes heraus, umgab auf der Labyrinthseite den Rahmen des ovalen wie den des runden Fensters mit einem Wall von Wachs und setzte in beide Wälle ein Kapillarmanometer ein, während auf der Paukenhöhlenseite eine mit dem Luftdruckapparat verbundene Glasröhre luftdicht über die Fenster gekittet wurde.

Es ist klar, daß durch die Einführung eines Labyrinthmanometers die Widerstände im inneren Ohre verändert werden. Wo es also nicht bloß darauf ankommt, den Einfluß von Luftdruckschwankungen innerhalb der Pauke auf die grobe mechanische Beweglichkeit der Kette oder ihrer einzelnen Teile zu untersuchen, sondern sich um feinere akustisch-funktionelle Probleme handelt, wird man vom Gebrauch des Manometers absehen und das Labyrinth intakt lassen. Statt dessen kommen die Methoden, welche zum Studium der Veränderung der Schallübertragung durch Kontraktion der Binnenohrmuskeln beim Präparat anwendbar sind, auch hier in Betracht, wo eben nur die Muskelwirkung durch die Verdichtung und Verdünnung der Paukenluft ersetzt wird.

Eine Drucksteigerung in der Trommelhöhle kann der Lebende meistens sehr einfach bei sich selbst hervorrufen, indem er die Nase zuhält und mit fest geschlossenem Munde die Backen kräftig aufbläst; der Exspirationsstrom überwindet dabei den Widerstand des Tubenverschlusses und dringt in die Pauke. Dieses Experiment, bekannt unter dem Namen des Valsalvaschen Versuches, gelingt noch leichter, wenn man während der Pression den Schlingakt ausführt und dadurch die Tuben öffnet. In der Ohrenheilkunde wird die Eintreibung von Luft in das Mittelohr, die „Luftdusche“, wenn sie nicht mittelst Katheters geschieht, durch Kompression eines großen Kautschukballons bewirkt. Derselbe ist mit einem birnenförmigen Ansatz versehen, der beim Einführen in die Nase deren Öffnung abschließt; das zweite Nasenloch wird mit dem Finger zugedrückt und dann in dem Moment, wo der Patient auf Kommando schluckt oder etwa „Hoh-uck“ oder „Clará“ sagt — was alles auf die Zusperrung des Nasenrachenraumes durch das gehobene Gaumensegel abzielt — der Ballon kräftig zusammengepreßt.

Um die Luft in den eigenen Trommelhöhlen zu verdünnen, schließt man Mund und Nase, inspiriert möglichst kräftig und macht gleichzeitig eine Schluckbewegung, wodurch die Tuben sich öffnen und einen Teil der Paukenluft austreten lassen. Dieses Experiment pflegt als negativer Valsalvascher Versuch bezeichnet zu werden, als Gegenstück zu dem vorhin erwähnten „positiven“.

Eine einfache Methode, um den zum Valsalvaschen Versuche nötigen Druck zu messen, hat A. Hartmann angegeben[2]). Zwei Äste eines dreiarmigen Schlauches werden, mit je einem der in der Ohrenheilkunde unter dem Namen „Birnen“ oder „Oliven“ gebräuchlichen Ansatzstücke armiert, in die Nasenlöcher der Versuchsperson fest eingefügt, während der dritte

1) Arch. f. Ohrenheilk., Bd. 16, S. 10, 1880.

2) Experimentelle Studien über die Funktion der Eustachischen Röhre, Leipzig, Veit u. Co., 1879.

Ast mit einem Manometer kommuniziert, an dem der Druck abzulesen ist. Auf solche Weise kann man messend vergleichen, wieviel weniger Druck zum Gelingen des positiven Valsalvaschen Experimentes, also zur Sprengung des Tubenverschlusses, gehört, wenn man statt der bloßen Wirkung der Exspirationspression den Schluckakt oder die Phonation zu Hilfe nimmt. Diese Versuchsanordnung setzt freilich voraus, daß die Druckluft von der Lunge der Versuchsperson selbst geliefert wird. Da jedoch hierbei namentlich die Phonation nur unvollkommen gelingt, verfuhr Hartmann auch so, daß er bloß das eine Nasenloch mit dem Manometer verband und in das andere von außen komprimierte Luft eindringen ließ. Unter allmählicher Drucksteigerung wurde dann durch Inspektion des Trommelfells festgestellt, bei welchem Stande des Quecksilber- oder Wassermanometers die Tubenöffnung während des Schlingens oder der Phonation erfolgte.

Bemerkenswert ist, daß nach den manometrischen Beobachtungen von Hartmann die Kopfhaltung einen bestimmten Einfluß auf die Durchgängigkeit der Tuben besitzt, was übrigens schon vorher von Lucae behauptet worden war. Am leichtesten gelingt nämlich der Luftdurchtritt bei aufrechter Stellung des Kopfes, während er erschwert ist bei halb nach unten gerichtetem Gesicht oder halb rückwärts gebeugtem Kopf sowie namentlich in der Rücken- und Bauchlage.

Während man an sich selbst den positiven oder negativen Valsalva-Versuch ausführt, läßt sich gleichzeitig beobachten, wie sich der Ton einer Stimmgabel oder auch der einer möglichst obertonreichen Klangquelle dadurch subjektiv verändert. Die Tonzuleitung kann hierbei sowohl durch Luftleitung als auch durch Knochenleitung stattfinden. Die objektive Klangveränderung prüft man in der schon bekannten Weise so, daß die Versuchsperson eine Gabel mit dem Stiele zwischen die Zähne nimmt oder auf den Scheitel setzt, das Valsalvasche Experiment ausführt und währenddessen ihr Ohr durch einen Schlauch von einem anderen auskultieren läßt, der den Klang vor und nach der Druckänderung hinsichtlich der Farbe und Intensität vergleicht. Wegen des raschen Verklingens der gewöhnlichen Gabeln ist es noch besser, an deren Stelle eine elektrisch betriebene oder etwa einen Bernsteinschen Unterbrecher durch einen Holzstab oder sonst irgendwie leitend mit den Kopfknochen der Versuchsperson zu verbinden[1]).

Es ist früher zuweilen behauptet worden, daß die Tube zur Wahrnehmung der Stimme diene. Daß dies nur unter pathologischen Verhältnissen wirklich der Fall sein kann, beweist nebst anderem schon die alte, von Joh. Müller auf Schellhammer zurückgeführte, leicht nachzuprüfende Erfahrung, daß eine in den Mund gebrachte tönende Stimmgabel nicht wahrgenommen wird. Etwas anderes ist es mit dem Hören der eigenen Stimme während des Valsalvaschen Versuches, wobei die Sprache erheblich verstärkt erklingt[1]). Ob Schall von der äußeren Luft her im Moment des Sichöffnens der Tuben durch diese in merklicher Weise zum Ohre gelangt, hat Hartmann[2]) durch konzentrierte Einleitung der Schallwellen in die Nase zu ermitteln versucht. Er hatte aber keinen Erfolg damit. Auch ist dazu zu bemerken, daß, wenn die Tubeneröffnung mittelst Schlingens er-

1) Vgl. hierzu z. B. Politzer, Arch. f. Ohrenheilk., Bd. 1, S. 327.
2) Hartmann, a. a. O. S. 54.

folgt, die Beobachtung durch Mitbewegung des Tensor tympani kompliziert wird, und daß andererseits beim Valsalva-Versuch das Geräusch der einströmenden Luft und die taktilen Empfindungen im Ohre störend ins Gewicht fallen.

III. Inneres Ohr: Gehörsempfindungen.

A. Physikalisch-Technisches.

1. Tonerzeugungsmittel.

Die für physiologisch- und psychologisch-akustische Untersuchungen hauptsächlich in Betracht kommenden Tonerzeugungsmittel sind die Gabeln, Saiten, Lamellen, Zungen, Lippenpfeifen und Sirenen. Seltener im Gebrauch, obwohl auch gelegentlich einmal von Nutzen, sind die Glocken, Stäbe, Membranen und Klangplatten.

Welche Tonquelle in einem gegebenen Falle die geeignetste ist, hängt von dem Zweck und den Bedingungen der betreffenden Versuchsanordnung ab. So wird man beispielsweise, wo es sich darum handelt, möglichst einfache Töne zu verwenden, das heißt Grundtöne, die von möglichst wenigen und schwachen Obertönen begleitet werden, Stimmgabeln wählen oder gedeckte Lippenpfeifen, bzw. angeblasene Flaschen und nicht etwa Zungen oder Sirenen. Ist es notwendig, einen Ton längere Zeit hindurch gleichmäßig andauern zu lassen, so muß man auf die Benutzung von Gabeln und Saiten ihres mehr oder weniger raschen Verklingens wegen verzichten, sofern deren Schwingungen nicht etwa elektromotorisch erregt oder durch einen anblasenden Luftstrom dauernd unterhalten werden. Kommt es dagegen wesentlich auf das Konstantbleiben der Tonhöhe an, so sind wieder die Gabeln und Saiten den Lippenpfeifen und namentlich den Sirenen mit ihren häufigen Schwankungen der Umdrehungsgeschwindigkeit vorzuziehen. Andererseits bieten die Sirenen wie jene Lippenpfeifen, deren Tonhöhe sich vermittelst eines Stempels variieren läßt, die große Annehmlichkeit, daß man mit einer und derselben Klangquelle eine größere Anzahl verschieden hoher Töne erzeugen und die Tonhöhe ohne große Umständlichkeiten wechseln kann.

Wie schon aus diesen wenigen Bemerkungen erhellen dürfte, erweist es sich häufig als nicht ganz leicht, für die Lösung irgendeines bestimmten akustischen Problems ein allen Anforderungen bestens gerecht werdendes Instrumentarium von Tonerzeugungsmitteln zu beschaffen, und jedenfalls ist für ein Laboratorium, welches nicht bloß gelegentlich eine besonders einfache akustische Demonstration oder Untersuchung ermöglichen, sondern ganz speziell akustischen Studien jeder Art dienen soll, vor allem eine ausreichend große Auswahl von Tonquellen unbedingt erforderlich. Zur vollständigen Ausrüstung eines solchen Laboratoriums gehören nach meinen Erfahrungen in erster Linie zwei Exemplare der Bezold-Edelmannschen kontinuierlichen Tonreihe inklusive Galtonpfeife, wodurch man nicht nur in den Stand gesetzt wird, jederzeit einen Ton von beliebiger Höhe inner-

halb der Hörgrenzen erzeugen zu können, sondern auch die Möglichkeit gewinnt, Tonpaare von beliebiger Schwingungszahlendifferenz zu bilden, wie dies unter anderem für Beobachtungen über die Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit notwendig ist; ferner eine möglichst kontinuierliche Reihe von Lippenpfeifen, für die mittleren Tonlagen am besten Sternsche Tonvariatoren; sodann ein möglichst umfassender Satz Appunnscher Zungenkasten (Tonmesser), einige elektrisch schwingende Saiten oder Lamellen (Bernsteinsche Unterbrecher), eine Anzahl Seebeckscher Sirenenscheiben und endlich ein kontinuierlicher Resonatorenapparat sowie eine Vorrichtung für Tondrosselung durch Interferenz.

Es sollen nun im folgenden die besonderen Eigentümlichkeiten der verschiedenen Tonerzeugungsmittel einzeln dargelegt und erörtert werden.

a) Die Bezold-Edelmannsche kontinuierliche Tonreihe.

Die kontinuierliche Tonreihe, zu der als integrierender Bestandteil die Edelmannsche Konstruktion der Galtonpfeife gehört, ist das Ergebnis der gemeinschaftlichen Arbeit des vor kurzem verstorbenen Professors der Ohrenheilkunde F. Bezold und des Physikers Professor M. Th. Edelmann in München. Sie erfüllt in kompendiöser Form den Zweck, die Herstellung irgendeiner gewünschten Tonhöhe von 16 Schwingungen[1]) an bis über die obere Hörgrenze hinaus zu erlauben. Es dienen dazu für die Töne von C_2 (Subkontra-C) bis a^2 Stimmgabeln, von a^2 bis a^4 Stempel-Labialpfeifen, von a^4 aufwärts die Galtonpfeife.

Die Gabeln der Tonreihe sind solche mit Laufgewichten. Hierdurch wird erstens — und das ist die Hauptsache — erreicht, daß man mit einer und derselben Gabel für ein ziemlich beträchtliches Stück der Tonskala (über eine halbe Oktave) auszukommen vermag, und zweitens die sonst nötige Größe der ganz tiefen Gabeln wesentlich beschränkt; denn während eine für das Jenaer Physiologische Institut seinerzeit von W. Preyer angeschaffte Gabel mit 13,7 Schwingungen eine Zinkenlänge von 1 m hatte, ist die Edelmannsche C_2-Gabel inklusive Stiel knapp 50 cm lang.

Die Gabeln sind auf streng wissenschaftlichem, teils optischem Wege nach dem Normal-$a^1 = 435$ v. d. gestimmt. Die Oktave ist, wie beim Klavier, immer in 12 Halbtöne geteilt und jeder Halbton durch einen über beide Zinken gehenden horizontalen Strich markiert. Die Tonbenennungen c, d, e, f, g, a, h sind unter dem betreffenden Strich auf der Zinke angegeben, die Bezeichnungen für cis (den Teilstrich zwischen c und d), für dis (den Teilstrich zwischen d und e) usw. dagegen weggelassen. Will man einen bestimmten Halbton einstellen, so ist bei den fünf höheren Gabeln die untere Kante der beiden Laufgewichte mit dem betreffenden Teilstrich zur Deckung zu bringen; bei den fünf tieferen muß die Schneide der abgeschrägten Kante des würfelförmigen Laufgewichtes auf den Teilstrich fallen, während dann das andere Laufgewicht so zu fixieren ist, daß die beiden in der Mitte der Laufgewichte angebrachten horizontalen Linien einander in einer Ebene liegend gegenüberstehen. — Bei den tieferen Gabeln kann

1) Wo in dieser Abhandlung von Schwingungen schlechthin die Rede ist, sind immer die Doppelschwingungen (v. d.) der deutschen Zählweise gemeint.

man statt der musikalischen Tonhöhen auch genaue Schwingungszahlen einstellen; die Teilstriche hierfür mit den darunterstehenden Ziffern befinden sich auf der rückseitigen Zinkenkante. — Werden beide Gewichte von einer Gabel abgenommen, so gibt sie „unbelastet" denjenigen Ton, der auf der Vorderseite am Herz der Gabel (zwischen Zinken und Stiel) angegeben ist. Die gleiche Tonbezeichnung steht auf den Laufgewichten, damit man weiß, zu welcher Gabel sie gehören. Außerdem trägt jedes Laufgewicht dieselbe Ziffer (1 oder 2) wie die Zinke, auf welcher es zu befestigen ist. — Die Gewichte werden beim Gebrauch der Gabeln mittelst der Schrauben fest gegen die Zinken gepreßt, um Klirrgeräusche zu vermeiden; eventuell kann man sich zum stärkeren Anziehen der Schrauben des beigegebenen Schraubenschlüssels bedienen, dessen Stifte in die Löcher der Schrauben passen. — Die Erregung der höheren Gabeln geschieht, indem man mit kurzem, kräftigem Schlage den Gummiring des federnden Schlägels gegen den Schraubenkopf des Laufgewichtes bzw. das Ende der Zinkenfläche fallen läßt, die der tieferen durch einen Faustschlag gegen das flache Laufgewicht.

Die beiden bis auf die Dimensionen übereinstimmend gebauten Pfeifen der kontinuierlichen Tonreihe bestehen aus je drei Teilen: dem eigentlichen Pfeifenkörper, einem Hohlzylinder, dessen freier Rand durch Abschrägung zu einer scharfen Schneide geformt ist, dem in diesem Zylinder verschieblichen Stempel und der Hülse, deren unterer Teil zur Führung für den Pfeifenkörper dient, während der obere das Pendant zur Luftkammer der gewöhnlichen Labial-Orgelpfeifen bildet, indem er außen mit einem Rohrstück endigt, worüber der die Anblaseluft zuführende Gummischlauch gezogen wird, und innen einen, der Schneide des Pfeifenrohres gegenüberstehenden, halbkreisförmigen, schmalen Schlitz hat, der der Kernspalte der Orgelpfeifen entspricht. Je weiter man den Stempel aus dem Pfeifenrohr herauszieht, um so tiefer, je mehr man ihn hineinschiebt, um so höher wird der Ton. Wie bei den Gabeln sind die einzelnen Halbtonhöhen durch Striche und Tonbezeichnungen auf dem Stempel markiert und daher sehr bequem und genau einzustellen. Einiges Probieren erfordert indessen das Auffinden der für jeden Ton, damit er rein und klar zu Gehör kommt, passendsten Maulweite, worunter der Abstand der Pfeifenrohrschneide von der Kernspalte zu verstehen ist. Für tiefere Töne muß die Maulweite größer, für höhere kleiner gemacht werden, weshalb eben auch das Pfeifenrohr in der Hülse verschieblich befestigt ist. Die Stärke des Anblasedruckes steht gleichfalls in einer gewissen Beziehung zur Maulweite. Zum Zwecke des Anblasens werden den Pfeifen Gummischläuche mit Mundstück mitgegeben. Jedoch ist es mit Rücksicht auf den hohen Feuchtigkeitsgehalt und die leicht eintretenden Druckschwankungen der Atmungsluft besser, sich, wenn es irgend angeht, eines Blasebalges mit konstantem und regulierbarem Druck zu bedienen. Edelmann meint zwar, den ungefähr richtigen Luftdruck (ohne Über- oder Unterblasen) könne man leicht unter Zuhilfenahme der höchsten Gabel der Tonreihe, deren Töne zum Teil mit denen der tieferen Pfeife zusammenfallen, beim Anblasen mit dem Munde einüben, doch bleibt es für einen Unmusikalischen immer mißlich, sich hinsichtlich der Tonhöhe, die ja mit dem Blasedruck steigt und sinkt, und der Tonreinheit auf sein Gehör verlassen zu müssen.

In der beistehenden Figur 5 ist die kontinuierliche Tonreihe in ihrem Etui abgebildet, wobei der Einsatz von seinem Platze über den tiefen Gabeln abgehoben und in den Deckel gesetzt ist. Nr. 1 bis 10 sind die Gabeln,

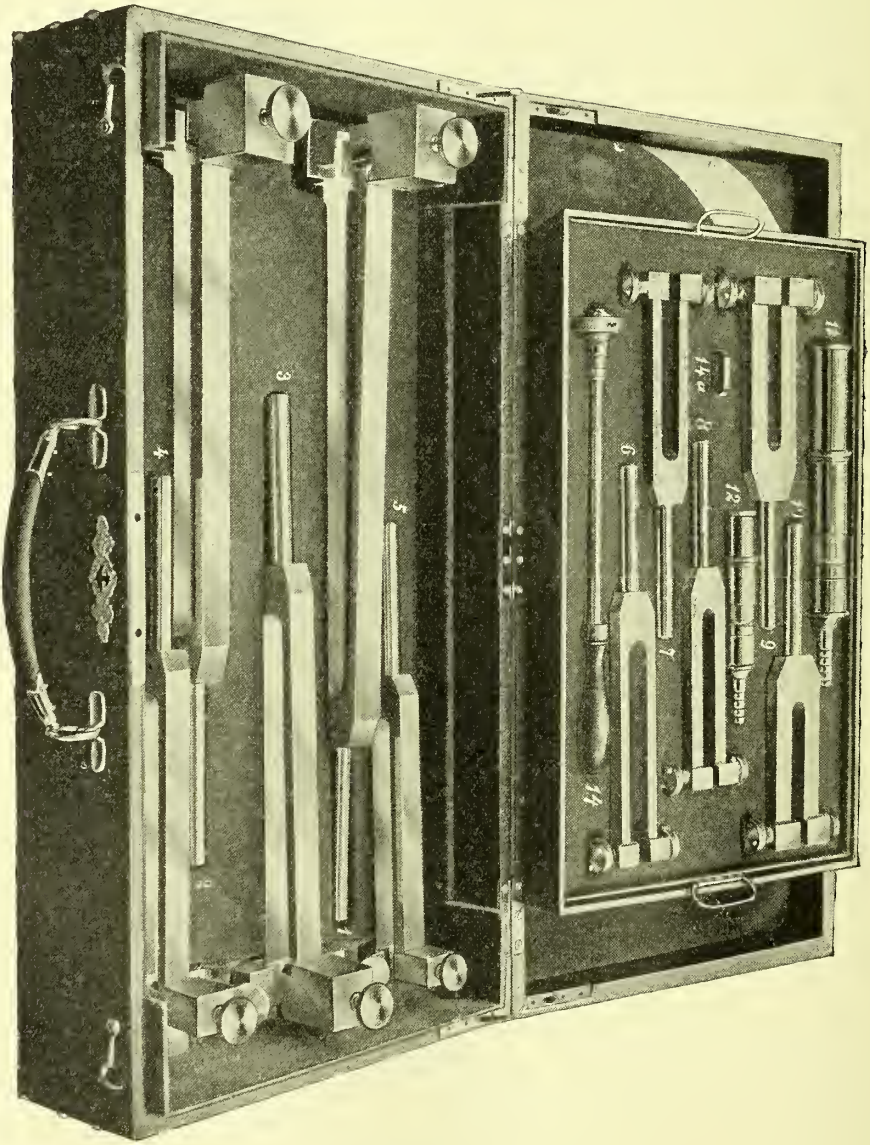


Fig. 5.

11 und 12 die Pfeifen, 14 der Schlägel, 14a der Schraubenschlüssel. Nr. 13, die Galtonpfeife, wird in einem besonderen Etui in Taschenformat geliefert. Alles zusammen ist zum Preise von 450 Mark aus dem Physikalisch-Me-

chanischen Institut von Edelmann und Sohn in München, Nymphenburger Straße 82, zu beziehen.

Die Galtonpfeife, von Edelmann „Grenzpfeife" genannt, ist zuerst von Francis Galton[1]) (1876) beschrieben und bald darauf von Burckhardt-Merian in das otiatrische Untersuchungsinstrumentarium eingeführt, in dem sie, durch Edelmann mehrfach verändert und verbessert, nach wie vor einen hervorragenden Platz behauptet. Sie ist aber auch, richtig angewendet, für den Physiker, Physiologen und Psychologen bei häufigeren und längeren Untersuchungen über sehr hohe Töne nahezu unentbehrlich.

Zur Erläuterung ihrer Konstruktion, die im Prinzip mit jener der eben beschriebenen Edelmannschen Pfeifen übereinstimmt, diene die Abbildung in Fig. 6. Die beiden wesentlichen Teile sind das Mundstück D und der Pfeifenkörper E. Die Anblaseluft wird in einem Gummischlauch zugeführt, den man über das Rohrende A zieht, und strömt durch Vermittlung eines ringförmigen Schlitzes aus dem Mundstücke gegen die messerscharfe kreisförmige Schneide (Labie), mit der der Pfeifenkörper dem Mundstücke genau gegenüber in passender, variabler Entfernung („Maulweite") endet. D und E sind in einen kräftigen Bügel eingeschraubt, an welchem das Instrument in die Hand genommen wird. — Das Mundstück D trägt eine Teilungstrommel B, die in Zehntel geteilt ist und mit ihrem unteren Rande an einer Teilung C — es sind hier nur drei Skalenteile notwendig — vorüberläuft. Man kann vermittelst dieser Mikrometervorrichtung den Abstand der Schneidenkanten von D und E, also die Maulweite, nach ganzen und Zehntel-Schraubenumgängen messen bzw. verändern. In der Figur ist gerade die Maulweite auf 0,6 Schraubenumgänge (von einer in Wahrheit nicht ganz Null betragenden Anfangsdistanz zwischen D und E weg) eingestellt. Würde man D von E durch Drehen an der Trommel noch um 4 weitere Skalenstriche der letzteren entfernen, so würde der untere Rand der Trommel B gerade in der Höhe des zweiten Horizontalstriches auf C (von unten gerechnet) stehen und damit die Maulweite 1 erreicht sein. — Der Pfeifenkörper E ist ein gedacktes zylindrisches Rohr; in seinem Innern befindet sich, luftdicht abschließend, ein Stempel, der sich längs einer außen sichtbaren Skala F hin- und herschrauben läßt, je nachdem man durch Verlängerung des Pfeifenlumens tiefere oder durch Verkürzung höhere Töne erzielen will. Den Stand der das Pfeifenrohr inwendig abgrenzenden Stempeloberfläche kann man jederzeit in Millimetern und deren Zehnteln an dem Maßstabe F und der Trommel G ablesen. In der Figur steht die begrenzende Ebene des Stempels genau 4,5 mm unterhalb der Maulweite.

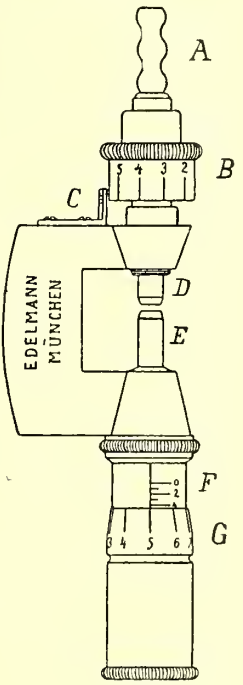


Fig. 6.

1) Siehe das Nähere in Francis Galton, Inquiries into Human Faculty and its Development, London 1883.

Seitdem nicht nur die Längen des Pfeifenlumens sondern auch die Maulweite an der Galtonpfeife meßbar gemacht ist, hat diese gegenüber ihren früheren Formen an Präzision ganz erheblich gewonnen[1]). In ihrer Art Vollkommenes leistet sie aber — und das kann nicht nachdrücklich genug betont werden — nur dann, wenn auch der Druck der Anblaseluft exakt kontrollierbar, variabel und nach Bedarf eine Zeitlang konstant zu erhalten ist. Edelmanns Methode, die Pfeife durch ein beigegebenes kleines Gummigebläse zum Tönen zu bringen, indem man den kurzen Schauch über das Rohrstück A zieht und darauf den in der hohlen Hand gehaltenen Ball mit der Daumenspitze stoßweise zusammendrückt, ist völlig unzureichend. Denn während der überaus kurzdauernden Tonerregung ist der Druck nichts weniger als gleichmäßig, vielmehr einem stetigen Wechsel unterworfen in der Weise, daß auf eine Phase steilen Anstiegs eine zweite ebenso steilen Abfalls folgt. Die Tonhöhe macht dabei ganz ähnliche Schwankungen, wodurch statt eines Tones ein Auf- und Ab-Glissando von Tönen entsteht. Nachdem schon seit längerer Zeit mehrfach von sorgsamen Beobachtern — ich nenne nur Stumpf und Meyer[2]) — hierauf aufmerksam gemacht worden war, sind diese Verhältnisse kürzlich von J. Hegener[3]) genau untersucht worden.

Er verband das Gummigebläße außer mit der Galtonpfeife durch ein T-Stück zugleich mit einem Plattenmanometer, bestehend aus zwei übereinanderliegenden Aneroidkapseln von geringem Volumen mit sehr dünnen Wänden, das in üblicher Weise mit Hebelübersetzung auf der berußten Trommel eines Kymographions den Druckverlauf während der Tonerregung in Kurvenform aufzeichnete. Nachher wurde manometrisch bestimmt, welchen Druckwerten in Zentimetern Wassersäule die einzelnen Ordinaten dieser Kurve entsprachen, und ferner, welche Tonhöhen die Pfeife bei den verschiedenen Drucken produzierte. Als Paradigma der Resultate dieses Verfahrens gebe ich hier aus Hegeners Arbeit die beistehende Figur 7[4]) wieder, die sich auf folgende Einstellung der Pfeife bezieht: Pfeifenlänge 2,0, Maulweite 0,88, angebliche Tonhöhe nach der Edelmannschen Eichungstabelle ca. 22000 v. d. Die Abszisse zeigt, daß die Tonbildung im ganzen nur fast 0,6 Sekunden dauert; die schwarze, ausgezogene Kurve, daß während dieser Zeit der Druck steil von 0 bis nahe an 65 cm steigt, um dann sofort noch steiler wieder auf ein Minimum abzusinken, und endlich die gestrichelte Linie, daß die Tonhöhe zwischen 10000 und 23000 auf und ab schwankt und sich nur ganz kurzdauernd in der Maximallage konstant hält.

Wird bei einer solchen Pfeifeneinstellung etwas gehört, so kann man lediglich sagen, daß der Untersuchte über 10000 v. d. hört, niemals aber,

1) Als ich vor ca. 13 Jahren bei einer größeren Untersuchung mit älteren Galtonpfeifen arbeitete und in Anbetracht des erheblichen Einflusses der Maulweite auf die Tonbildung Edelmann die Anfertigung einer Vorrichtung zur Messung derselben nahelegte, sandte er mir zunächst einen graduierten Elfenbeinkeil, der zum Zweck der Distanzablesung zwischen die Schneiden von D und E geschoben wurde, und brachte dann bald darauf die neue Konstruktion der Pfeife mit der Trommel B in den Handel.

2) Wiedemanns Annalen der Physik und Chemie, Bd. 61, 1897.

3) Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. d. Ohres usw. Bd. 3, S. 413, 1910.

4) Die kleinen Kreise in der Figur bedeuten hier nicht weiter interessierende gelegentliche Nebentöne.

ob der vernommene Ton derselbe ist wie der, den etwa die Kundtsche Röhre gleichzeitig anzeigt. Es kann sehr leicht geschehen, daß die Staubfigur auf einen sehr hohen, das Ohr aber auf einen viel tieferen Teilton oder Komplex von Teiltönen des Gesamt-Glissandos reagiert, und zweifellos erklärt es sich auf diese Weise, daß die nach alter Art mit dem Gummigebläse zum Tönen gebrachten und dabei durch Kundtsche Staubfiguren kontrollierten oder geeichten Galtonpfeifen Hörgrenzen bis zu 50000 Schwingungen ergeben, während bei Verwendung von Instrumenten mit exakt ge-

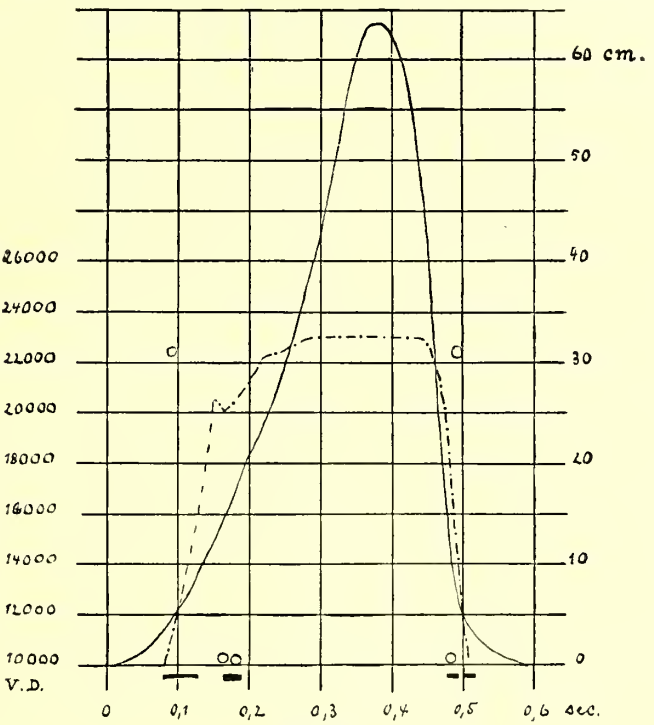


Fig. 7.

messenen Tonhöhen die Grenzregion immer wieder in der Gegend von 20000 v. d. gefunden wird.

Schon vor der eben zitierten Hegenerschen Untersuchung hatte übrigens Edelmann mit anerkennenswerter Objektivität die Mangelhaftigkeit des bisherigen Gummigebläses und die damit zusammenhängende Unbrauchbarkeit der jeder zum Verkauf kommenden Pfeife beiliegenden, mittelst der Kundtschen Staubfigurenmethode hergestellten Eichungstabelle zugegeben und sich um eine neue Verbesserung der Pfeife bemüht. Er glaubt jetzt [1]), eine solche darin gefunden zu haben, daß in den Schlauch, der den Gummiball mit der Pfeife verbindet, ein Metallröhrchen mit sehr enger Bohrung (0,2 mm) eingefügt wird. Wenn man dann kräftig drücke, entströme die Luft dem

1) Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. d. Ohres usw. Bd. 3, S. 261, 1910.

Ballon langsam und mit bequem gleichzuhaltendem Druck, der außerdem auf diese Weise den für die richtige Intonation der Pfeife nötigen Wert von 10 cm Wasser nicht überschreiten könne. Auch das Eichungsverfahren ist ein anderes geworden. Es wird dazu nicht mehr die Staubfigur, sondern die N. Schmidtsche empfindliche Flamme benutzt[1]).

Demgegenüber ist indessen von Hegener a. a. O. festgestellt worden, daß weder diese Neueichung noch die Einführung des Diaphragmas in das Gebläse das halten, was Edelmann von ihnen verspricht. Einen anschaulichen Beleg hierfür gibt Fig. 8, die ebenso zu verstehen ist wie Fig. 7. Sie bezieht sich auf eine Pfeifenlumenlänge von 1,39 und eine Maulweite von 0,74. Der Druck des Gebläses mit Diaphragma steigt und sinkt, wie

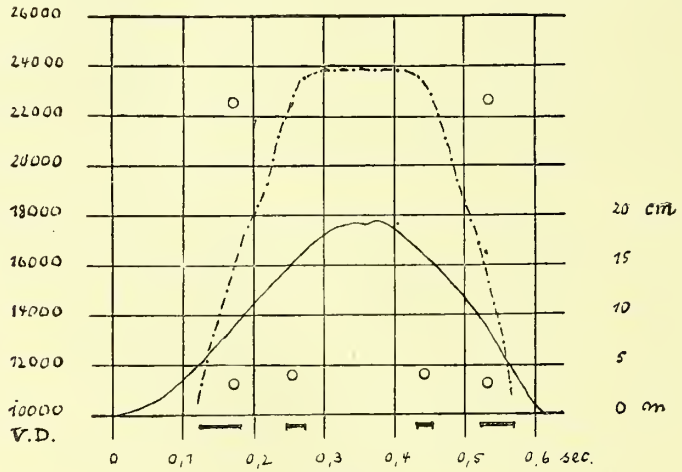


Fig. 8.

man sieht, langsamer, als wenn das Diaphragma fehlt, ist aber auch in keinem Augenblick konstant, und sein Maximum beträgt nicht 10 sondern 20 cm Wasser. Die Tonhöhe zeigt eine ähnliche Kurve wie in Fig. 7 und erreicht 24000 v. d., während sich der Eichwert nach Edelmann für die angegebenen Einstellungen der Pfeife auf 19000 beläuft.

Die neueste Form der Galtonpfeife bedeutet daher im Vergleich mit der älteren keinerlei Fortschritt und für die Region der sehr hohen Töne sogar einen wesentlichen Rückschritt, insofern Edelmann durchweg einen Druck von nur 10 cm Wasser empfiehlt. Denn nach früheren zahlenmäßigen Beobachtungen Hegeners[2]) wird bei den ganz kurzen Pfeifenrohrlängen erst unter einem Anblasedruck von 30 cm Wasser und darüber die eigentliche Resonanz des Pfeifenlumens in Anspruch genommen, wobei die Tonhöhe dann auch trotz größerer Druckschwankungen noch leidlich konstant bleibt, während bei Druckwerten von 20 cm und darunter schon sehr geringe

1) Näheres bezüglich der Staubfiguren und der Schmidtschen Flamme im Kapitel über Schwingungszahlenbestimmung.

2) Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. d. Ohres usw. Bd. 1, S. 321ff., 1908.

Änderungen der Druckstärke oder der Maulweite so erhebliche Sprünge der Tonhöhe zuwege bringen, daß jede einigermaßen genaue Bestimmung derselben fraglich wird.

Es bleibt also dabei, daß man auf das Gummi-Handgebläse überhaupt verzichten muß, wenn man mit der Galtonpfeife eine genau bestimmte Tonhöhe erhalten und, wie es doch fast immer erwünscht sein wird, auch beliebig lange innehalten will. In einem Laboratorium oder einer Klinik dürfte es ja auch kaum Schwierigkeiten machen, die Galtonpfeife mit einem durch ein Manometer kontrollierbaren Gebläse zu verbinden[1]), welches einen hinreichend hohen und konstanten Druck zu erzeugen vermag. Dagegen verliert freilich die Galtonpfeife in der ohrenärztlichen Privatpraxis mit dem Gummigebläse den großen Vorzug der einfachen Handhabung. Jedoch sind gegenwärtig im Physiologischen Laboratorium der Berliner Charité-Ohren-Klinik Versuche darüber im Gange, wie sich die Galtonpfeife in möglichst bequemer Weise, unter Ablesung eines Manometers und Auffangen der Atemfeuchtigkeit durch eine Chlorcalciumröhre, mit dem Munde — wobei ein genügend gleichmäßiger und andauernder Druck bis zu 30 cm Wasser und mehr leicht zu erzielen ist — anblasen läßt.

b) Stimmgabeln.

Die Stimmgabel, die im Jahre 1711 von dem königlichen Trompeter und Lautenisten John Shore in London erfunden sein soll, ist wegen ihrer bequemen Handhabung, ihres reinen Klanges und ihrer relativen Unverstimmbarkeit als Tonquelle in wissenschaftlichen Laboratorien wie in der Praxis des Ohrenarztes besonders beliebt. Es ist deshalb auch eine ziemlich umfangreiche Literatur über ihre verschiedenen Eigenschaften entstanden, welche kürzlich von E. A. Kielhauser[2]) gesammelt und zu einer lesenswerten Monographie verarbeitet ist.

Chladni[3]) war der erste, der sich mit den Schwingungsformen von Stimmgabeln theoretisch beschäftigte, indem er sie von denen eines gerades Stabes herleitete. Nach ihm schwingen die Zinken, wenn die Gabel ihren Grundton gibt, dergestalt, daß annähernd an jenen Stellen, wo die Zinken in die Krümmung übergehen, sich jederseits ein Schwingungsknoten bildet. Während die beiden Knoten dauernd in Ruhe bleiben, schwingen die Zinkenenden abwechselnd das eine Mal gegeneinander, wobei der gekrümmte Teil der Gabel nach unten geht, das andere Mal auseinander, wobei das Bogenstück sich aufwärts durchbiegt. Durch die Oszillationen des gekrümmten Mittelstückes erklärt es sich, daß der Grundton der Gabel auch im Stiel, der ja diese Bewegungen mitmachen muß, in Form von Longitudinalschwingungen auftritt. Allerdings hat Struycken[4]) in verschiedenen Fällen nachgewiesen, daß bei einer im Grundton schwingenden Gabel nur eine Knotenstelle und zwar etwas seitlich vom Stielansatz vorhanden ist. Doch

1) Vgl. das Kapitel „Labialpfeifen und Gebläseeinrichtungen".

2) Die Stimmgabel, ihre Schwingungsgesetze und Anwendungen in der Physik. Leipzig, B. G. Teubner, 1907.

3) Akustik, Leipzig 1802, S. 111ff.

4) Ann. d. Physik, Bd. 23, S. 645, 1907.

dürften wohl Gabeln von differentem Typus hierin voneinander abweichen und namentlich die älteren Formen mit nicht schwer massivem Mittelstück das von Chladni angenommene Verhalten zeigen. Wenigstens spricht hierfür nach Waetzmann[1]), daß in solchen Gabeln der Grundton ganz besonders stark als longitudinale Stielschwingung zu konstatieren ist, namentlich, wenn die Zinken parallel stehen. Werden die Zinken dagegen etwas zusammengebogen oder auf den Innenseiten belastet, so verschwindet, wie Lord Rayleigh[2]) gezeigt hat, der Grundton in dem Stiele, zum mindesten soweit er durch longitudinale Schwingungen bedingt ist. Die transversalen Stielschwingungen im Tempo des Gabelgrundtones werden durch Zusammenbiegen der Zinken oder durch Belastung ihrer Innenseiten nicht ausgelöscht, wie von vornherein zu erwarten, da ihre Ursache in Unsymmetrieen, sei es des Baues, sei es des Materials der Gabel, zu suchen ist, die sich selbst bei sorgfältigster Anfertigung kaum ganz vermeiden lassen[3]). Die transversalen Stielschwingungen geben ihrerseits Veranlassung zu eigenen Longitudinalschwingungen. Führt der Stiel eine transversale Schwingung von der Periode n aus, so ist mit dieser theoretisch notwendig eine longitudinale von der Periode $2\,n$ verbunden, worauf schon Rayleigh[4]) aufmerksam gemacht hat.

Hauptsächlich charakteristisch für die Stielschwingungen einer Gabel sind also der transversale und longitudinale Grundton und dessen longitudinale Oktave. In welcher Stärke und mit welchen anderen Tönen vermengt diese Stieltöne auftreten, hängt in jedem einzelnen Falle von der individuellen Beschaffenheit der Gabel, dem Erregungsmodus und der Art der Befestigung des Stieles während des Klingens ab. Weil der Grundton der Gabeln älterer Form, bei denen Zinken und Bogenstück gleichen Querschnitt haben, am Stiele stärker und reiner hervortritt, empfiehlt Edelmann, der nach dem Tode von R. Koenig in Paris in technischer Beziehung wohl der beste Stimmgabelkenner ist, diese Gabeln für solche Zwecke zu bevorzugen, wo es, wie bei der Montierung auf Resonanzkasten oder bei der Prüfung der Kopfknochenleitung, gerade auf die Stielschwingungen ankommt, während die neuere Gabelform mit massigem Mittelstück dort am Platze sei, wo man mehr auf den Ton der Zinken reflektiert[5]).

Den akustisch-experimentellen Nachweis des Stielgrundtones und seiner Oktave kann man mit Hilfe von Interferenzvorrichtungen führen, die die störenden Töne auslöschen, oder von Resonatoren, die den gesuchten Ton verstärken[6]). Die gleichen Mittel sind auch zum Studium der nunmehr zu besprechenden Zinkentöne geeignet.

Bei den Zinkentönen muß man streng unterscheiden zwischen den harmonischen Obertönen des Grundtones und jenen (im allgemeinen) unharmonischen Obertönen, die durch Zerlegung der Zinken in verschiedene, durch Knoten getrennte, für sich schwingende Unterabteilungen

1) Physikal. Zeitschr. 10 Jahrg., S. 409, 1909. Auch Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. d. Ohres usw. Bd. 3, S. 368, 1910.
2) Philos. Magazine, 6. Ser., Bd. 13, S. 325, 1907.
3) Vgl. Edelmann, Zeitschr. f. Ohrenheilk. Bd. 53, S. 341ff.
4) Philos. Magazine, 3. Ser., Bd. 5, S. 460, 1877.
5) Physikal. Zeitschr. 6. Jahrg., S. 445ff.
6) Vgl. A. Lucae, Die chronische progressive Schwerhörigkeit, Berlin 1907, S. 142ff.

hervorgerufen werden[1]). Die Töne der letzteren Art liegen alle sehr hoch über dem Grundtone. Denn setzt man dessen Schwingungszahl gleich 1, so entspricht dem ersten unharmonischen Obertone eine zwischen 5,8 und 6,6 liegende Schwingungszahl. Die Schwingungszahlen der weiteren unharmonischen Zinkentöne folgen einander ebenfalls in relativ großen Abständen der Tonhöhe. Untersuchungen hierüber, die aber noch der Vervollständigung bedürftig sind, verdanken wir hauptsächlich Chladni und nach ihm Helmholtz, welcher in seiner Lehre von den Tonempfindungen[2]) hierüber sagt: „Nennen wir den Grundton der Stimmgabel c, so sind die folgenden Töne etwa as^2, d^4, cis^5. . . Übrigens ist zu bemerken, daß das Verhältnis der Stimmgabeltöne zu einander etwas verschieden ist nach der Form der Gabel und die gemachten Angaben deshalb nur als annähernd betrachtet werden dürfen." Diese hohen Nebentöne bewirken neben dem Grundtone ein helles, unharmonisches Klingen, das bei tieferen, frei in der Luft tönenden Gabeln in einiger Entfernung den Grundton ganz überdecken kann. Das Ohr trennt sie aber leicht vom Grundtone und ich für meine Person habe sie eigentlich nie bei Stimmgabeluntersuchungen als störend empfunden, zumal sie rasch verklingen und sich überdies durch leises Berühren der Zinken in ihrem unteren Teile meist sofort beseitigen lassen; es ist gar nicht nötig, den zu diesem Zweck von Appunn[3]) empfohlenen Tuch- oder Gummiring über die eine Zinke zu ziehen.

Mit den harmonischen Obertönen verhält es sich anders. Unter ihnen kommt in allererster Linie die Oktave des Grundtones in Betracht, dann die Duodezime und die Doppeloktave; sehr häufig lassen sich auch noch weitere harmonische Teiltöne im Gesamtklange der Gabel nachweisen, gelegentlich bis zum zwölften oder gar bis zum sechzehnten[4]). Zum Nachteil für manche physiologischen und otiatrischen Untersuchungen sind diese harmonischen Obertöne auf keine andere Weise als durch das nicht immer anwendbare und stets umständliche Verfahren der Tondrosselung mittelst Interferenz gänzlich zu beseitigen; ein Umstand, der namentlich bei der Bestimmung der normalen oder pathologischen unteren Hörgrenze volle Beachtung verdient.

Die Entstehungsweise der harmonischen Gabelobertöne ist erst neuerdings, wenigstens in bezug auf die besonders wichtige Oktave, durch Lindig[5]) aufgeklärt worden. Nach der einfachen Theorie Chladnis, der die Gabel lediglich als gebogenen Stab betrachtete, ist die Oktave überhaupt unmöglich. Dies war auch wohl der Grund, daß Helmholtz anfänglich die Gabeln für frei von harmonischen Obertönen hielt und sich erst später unter Anwendung geeigneter Resonatoren vom Gegenteil überzeugte[6]). Lindig hat nun ge-

1) Harmonische Obertöne sind bekanntlich solche, deren Schwingungszahl ein ganzzahliges Multiplum von derjenigen des Grundtones ist.

2) 5. Ausgabe, S. 121.

3) Anton Appunn, Akustische Versuche über Wahrnehmung tiefer Töne usw. Akustisches Institut in Hanau 1889, S. 15.

4) Die wichtigste Untersuchung hierüber ist die Abhandlung von C Stumpf: Über die Ermittelung von Obertönen. Wiedemanns Annalen d. Physik u. Chemie, Bd. 57, S. 660—681, 1896.

5) Annalen d. Physik, 4. Folge, Bd. 11, S. 31 ff, 1903.

6) Lehre v. d. Tonempf., 5. Ausgabe, S. 263.

zeigt, daß die Oktave zwar in der Tat nicht in den Zinken, wohl aber in der sie umgebenden Luft entsteht, also nicht direkt, sondern indirekt durch die Zinken hervorgerufen wird.

Trotzdem somit die Existenz der harmonischen Zinkenobertöne nicht nur experimentell unzweifelhaft feststeht, sondern auch theoretisch verständlich gemacht ist, wird dieselbe gerade von Ohrenärzten noch vielfach außer Acht gelassen. Bedauerlicherweise trägt Edelmann hierzu bei, indem er in den Prospekten seines Physikalisch-Mechanischen Institutes „obertonfreie" Stimmgabeln[1]) empfiehlt, ohne genügend zu betonen, daß mit diesem Epitheton nur die hohen unharmonischen Obertöne gemeint sind und nicht die erheblich nachteiligeren harmonischen, die man in jeder Edelmannschen Gabel wie in allen anderen mit Leichtigkeit physikalisch nachweisen kann, selbst wenn dies wegen ihrer psychophysiologischen Verschmelzung mit dem Grundtone nicht mit bloßem Ohre gelingt.

Zur Erregung einer Gabel bedient man sich am besten eines mit Kolophonium genügend versehenen Violin- oder Cellobogens. Durch das Anstreichen erreicht man einen besonders lauten und langen Ton und schont dabei die Gabel am meisten. In manchen Fällen ist ein Baßbogen noch vorzuziehen. Wie man mit einem Geigenbogen eine maximale Wirkung erzielen kann, hat Melde beschrieben[2]). Er sagt: „Ich nehme den Violinbogen in die rechte Hand, und zwar so, daß der dritte, vierte und fünfte Finger (nach üblicher Bezeichnung beim Klavierspiel) zwischen das Haarband und den Stiel des Bogens, der Daumen dagegen als Stützpunkt oben auf den Stiel zu liegen kommt. Mit diesen vier Fingern kann der Bogen an jeder Stelle seiner Länge festgehalten werden. Der noch übrig bleibende Zeigefinger übernimmt nun weiter eine doppelte Rolle: nämlich einmal grenzt er ein Stück des Haarbandes ab und sodann, was die Hauptsache ist, er drückt das Haarband nach dem ihm gegenüberliegenden Daumen hin und spannt so den Bogen in einem Maße, wie es für gewöhnlich ganz unmöglich ist."

Will man eine Gabel durch Anschlagen erregen, so darf dies niemals mittelst eines derartig harten oder kantigen Gegenstandes geschehen, daß Verletzungen des Metalls eintreten. Große Gabeln schlägt man mit der Faust, kleinere mit einem Klöppel, der wie etwa der oben erwähnte Edelmannsche auf einem federnden Stiel einen schweren, aber gepolsterten Kopf trägt, so daß letzterer zwar mit einem gewissen Schwung, indessen doch weich die Zinke trifft.

Gabeln mit langen, biegsamen Zinken bringt man wohl auch dadurch zum Tönen, daß man die Zinkenenden zwischen Daumen und Zeigefinger faßt, zusammendrückt und durch rasches Abziehen der Finger losläßt[3]).

---

1) Vgl. auch Zeitschrift f. Ohrenheilk. Bd. 54, S. 258, wo Edelmann eine physikalisch sehr interessante Methode zur Beseitigung des ersten unharmonischen Obertones mitteilt.

2) Akustik, Leipzig, F. A. Brockhaus, 1883, S. 153.

3) Freilich muß man hinterher die Fingerfeuchtigkeit von den Zinken abwischen, wie man denn überhaupt jede Gabel, um sie vor Rost zu schützen, stets nach dem Gebrauch mit einem weichen Lederlappen putzen und vor längerem Nichtgebrauch einölen oder mit einer Kappe aus weichem Leder überziehen sollte.

Sehr kleine Gabeln, zumal wenn sie massig sind, streichte man immer mit dem Bogen an oder nach dem Vorschlage von Antolik[1]) mittelst eines Glasstabes. Melde[2]) führte diese Methode so aus, daß er an die schmale Seite einer Zinke ein Korkstückchen von der Form der Fig. 9 ankittete. In der Auskerbung α wird ein mäßig befeuchteter Glasstab unter einigem Druck hin- und hergezogen. Allerdings ändert die Belastung die Schwingungszahl der Gabel etwas, doch darf dies bei ganz hohen Tönen in der Regel vernachlässigt werden.

Vielfach ist es erwünscht, eine und dieselbe Gabel mehrmals hintereinander mit genau gleicher Stärke zu erregen, etwa um für eine Reihe von Versuchen stets die nämliche Klangdauer zu erhalten. Man hat zu diesem Zwecke Pendelapparate ersonnen[3]), bei denen ein fallender Körper mit konstanter lebendiger Energie gegen die Zinke schlägt. Beliebter ist die von Lucae[4]) angegebene Hammeranschlagsvorrichtung, von der die Figuren 10 u. 11 ein leichtverständliches Bild geben. Der Autor schreibt darüber[5]): „Das zur freien Handhabung der Gabel am Griff angebrachte Schlagwerk besteht in einem aus Stahl gefertigten Hammer (h), welcher durch eine starke Spiralfeder (a) in Bewegung gesetzt wird. Diese Feder wird wie an einer Sehußwaffe aufgezogen und durch eine Abzugsfeder (c), an welcher zu diesem Zwecke für den Daumen eine Platte angebracht ist, ausgelöst. Sehr wichtig ist, daß diese Abzugsfeder immer denselben Spielraum hat, was durch eine Hemmungsvorrichtung (d) bewirkt wird. Durch eine dritte, oberhalb des anzuschlagenden Gabelzinkens angebrachte flache Feder (b) wird vermieden, daß der Hammer nach dem Auffallen auf dem Zinken liegen bleibt. In Fig. 11 ist der Moment dargestellt, in welchem die Feder aufgezogen ist. Der etwaige Einwand, daß die drei Federn auf die Dauer das gleichmäßige Arbeiten des Mechanismus beeinträchtigen könnten, ist insofern hinfällig, als der Apparat bei vorsichtiger Handhabung mir in einer langen Reihe von Jahren bei fast täglicher Benutzung durchaus gleichmäßige und bestimmte Resultate geliefert hat[6]). Es sei hier gleich bemerkt, daß die Schraubenvorrichtung (F), um welche sich als Achse der Hammer dreht, eine sehr wichtige Rolle spielt, insofern durch stärkeres oder loseres Anziehen derselben die Hörzeit der Gabel zu modifizieren ist. Die Handhabung des Instrumentes findet in der Art statt, daß zunächst durch Herabdrücken von e und Einspringen des Hakens bei c die Gabel aufgezogen wird, dann das Instrument bei g wie eine Schreibfeder in die Hand genommen wird und darauf durch Vorschieben des Daumens gegen die Platte bei c der Abzug bewerkstelligt wird. Für c^4 (Fig. 11, halbe natürliche Größe)

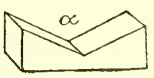


Fig. 9.

1) Mathemat. u. Naturwiss. Ber. aus Ungarn, 8, S. 295.

2) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem. Bd. 51, S. 683, 1894.

3) Z. B. Magnus, Archiv f. Ohrenheilk. Bd. 5, S. 127; Blegvad, ebenda, Bd. 67, S. 285.

4) Verhandlungen d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. (8. Versammlung in Hamburg), Jena 1899, S. 41.

5) Lucae, Die chronische progressive Schwerhörigkeit; Berlin 1907, S. 156ff.

6) „Natürlich müssen sie (die Federn), wenn sie sich auf die Dauer bewähren sollen, gut gearbeitet sein wie die von R. Détert in Berlin, Karlstr. 9, gelieferten Instrumente."

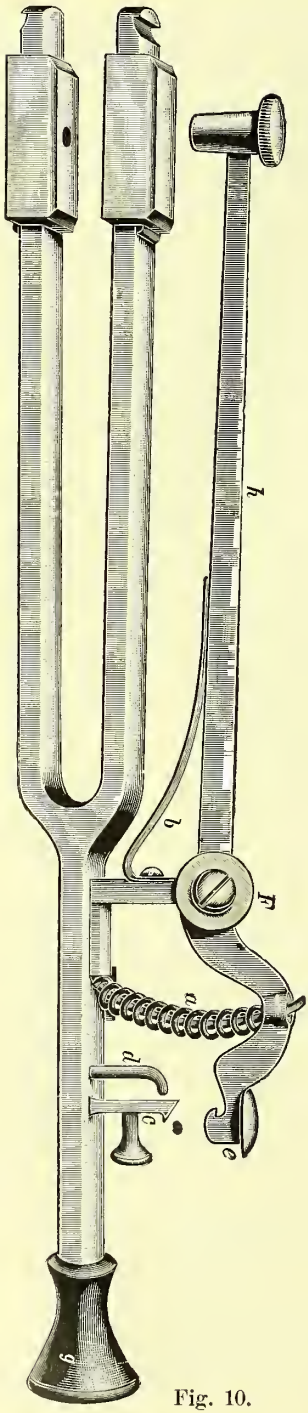


Fig. 10.

ist der Apparat in derselben Weise konstruiert, nur mit dem Unterschiede, daß der Hammerkopf hohl ist, bei i durch eine Schraubenvorrichtung geöffnet und mit Quecksilber zur Erzielung eines starken Anschlags gefüllt werden kann. Ein zweiter Unterschied besteht darin, daß die ganze Anschlagsvorrichtung durch die Flügelschraube (h) von der Stimmgabel enfernt werden kann. Wie auch Quix beobachtet hat, ist es sehr wichtig, daß die Schraube nicht lose, sondern so fest wie möglich sitzen muß, weil im ersteren Falle die Hörzeit beträchtlich abnimmt."

Ein zweites naheliegendes Mittel zu dem Zweck, einer Gabel immer dieselbe Anfangsamplitude zu erteilen, ist das, die Zinkenenden bis auf eine genau meßbare und stets gleiche Distanz auseinander zu spreizen und dann loszulassen. Ein derartiges Instrument, welches dem

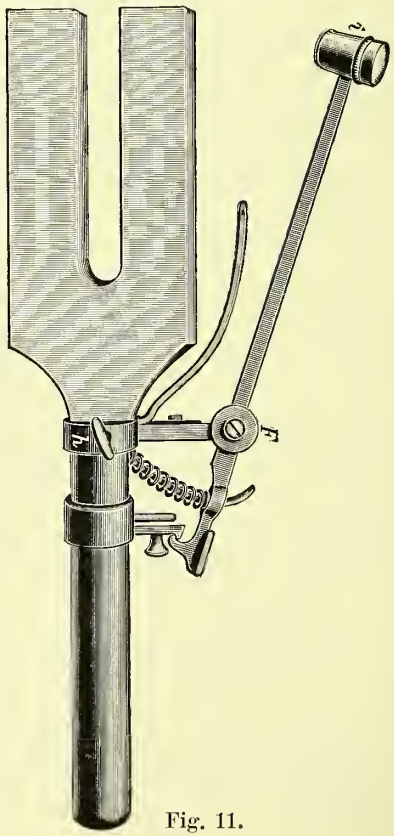


Fig. 11.

Roserschen Mundsperrer ähnelt, hat z. B. Ostmann bei seinen Studien über ein objektives Hörmaß benutzt und in seiner Monographie über dieses Thema beschrieben [1]). Eine etwas andere Konstruktion ist von Dölger [2]) angegeben. Sein „Stimmgabelerreger", zu beziehen von der Firma Ludwig Dröll, Fabrik medizinischer Bedarfsartikel in Frankfurt a. M., besteht, wie Fig. 12 zeigt, aus zwei parallellaufenden kräftigen Stahlschienen, deren obere, mit Elfenbein bekleidete Enden zwischen die Stimmgabelzinken geschoben werden und beim Anziehen der Schraube die mittelst des Maßstabes kontrollierbare Spannung der letzteren bewirken. Der kleine Apparat, den ich selbst öfter benutze, ist etwas umständlicher im Gebrauch als die Hammervorrichtung, hat aber den Vorzug, für fast alle Stimmgabeln anwendbar zu sein. Mathematisch genau übereinstimmende Abklingezeiten erhält man übrigens auch mit dem „Dölger" nicht, wenn man mittelst desselben mehrmals hintereinander die nämliche Gabel erregt und sie dann vor dem Ohre abklingen läßt, mag das nun an dem von Fall zu Fall etwas verschieden ausfallenden Abziehen

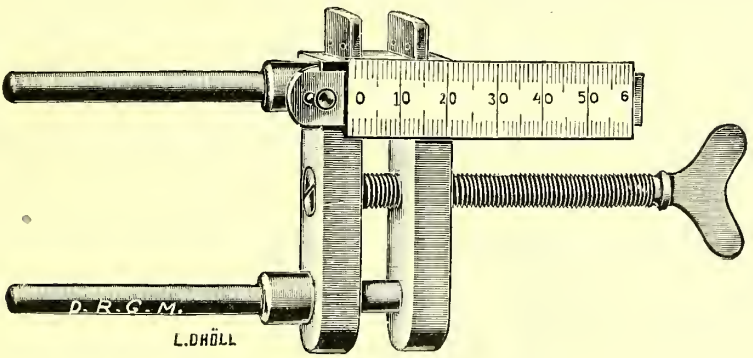


Fig. 12.

des Apparates von der Gabel oder an der Schwierigkeit, den Maßstab auf Bruchteile eines Millimeters präzise einzustellen, liegen oder daran, daß man die Gabel nicht jedesmal in vollkommen gleicher Lage und Entfernung vors Ohr hält, was namentlich wegen der Selbstinterferenz der Gabeln von Bedeutung ist.

Ein Verfahren, eine Stimmgabel zu gleichmäßig fortdauerndem Tönen mit starken Schwingungen zu bringen, hat J. R. Ewald ersonnen [3]). Der Grundgedanke ist folgender. Die Stimmgabel wird in horizontaler Lage, die eine Zinke über der anderen, befestigt. An der unteren Zinke befindet sich ein senkrecht abwärts gerichteter, ungefähr 10 mm langer Draht, der mit einer horizontalen dünnen Platte von etwa 5 mm Durchmesser endet. Unterhalb der letzteren ist eine zylindrische Röhre von ein wenig größerem Lumen angebracht, in welcher die Platte beim Schwingen

1) P. Ostmann, Ein objektives Hörmaß u. seine Anwendung; Wiesbaden 1903, S. 6 und Zeitschr. f. Ohrenheilk. Bd. 51, S. 237 ff. (Abbildung des Instrumentes auf S. 243.)

2) Münchener Med. Wochenschr. Nr. 22, 1909 und: Die ohrenärztl. Tätigkeit d. Sanitätsoffiziers, 2. Aufl., Wiesbaden 1910.

3) Pflügers Archiv, Bd. 44, S. 555, 1889.

der Gabel wie ein fast luftdicht schließender Stempel auf und nieder geht. Wird durch die Röhre ein Luftstrom oder ein Wasserstrom gesogen oder gedrückt, so setzt derselbe die Platte und damit die Gabel in Bewegung [1]).

Eine andere Konstruktion zur kräftigen Erregung von Gabeln durch Preßluft hat Edelmann angegeben [2]). Auf dem Resonanzkasten R (Fig. 13) einer Gabel G ist mittelst des Ständers s eine Düse a montiert, welche gegen die Gabelzinke mit einer großen Randfläche endigt, in der Mitte mit einem kleinen, nach außen konisch erweiterten Loche versehen und durch eine Stellschraube cd in ihrer Entfernung von G regulierbar ist. Durch den Schlauchansatz b wird mittelst umflochtenen Schlauches die Preßluft zugeführt, die aber einen Druck von mindestens zwei Atmosphären haben muß, während bei der Ewaldschen Anordnung ein Druck von wenigen Zentimetern Hg genügt.

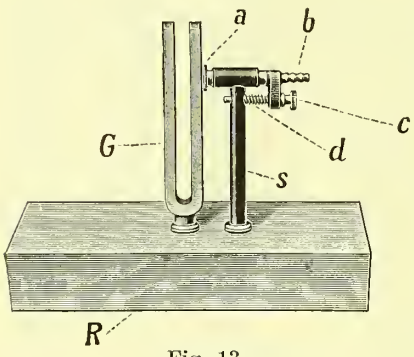


Fig. 13.

Das Prinzip des elektrischen Antriebes möge Fig. 14 erläutern, die eine ältere Form der „elektrischen Gabel“ darstellt. Der Strom von 1 oder 2 Bunsenelementen oder einer anderen gleichwertigen Stromquelle

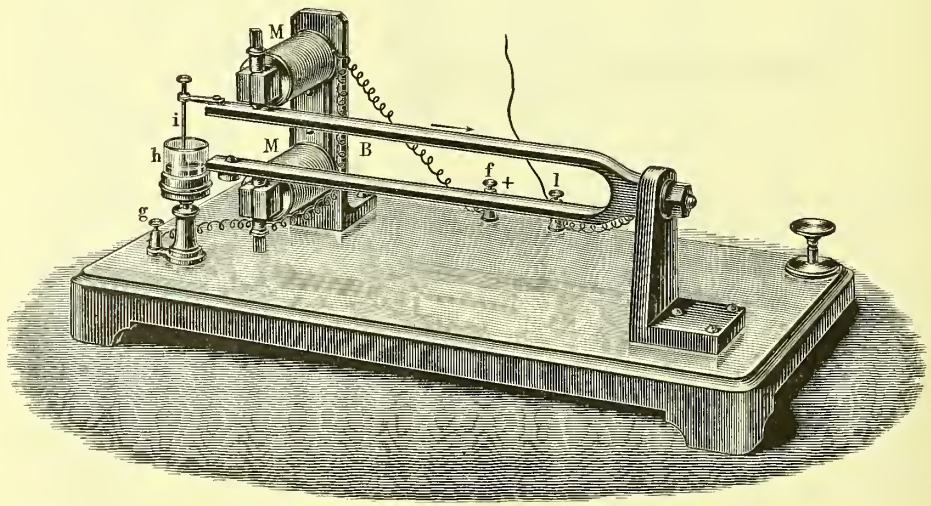


Fig. 14.

wird der Klemme f zugeführt, geht durch die Spulen MM, dann über die Klemme g in das Quecksilbernäpfchen h und von hier über i und die obere

1) Stimmgabeln mit Luftantrieb werden von Herrn Mechaniker Majer in Straßburg i. E. angefertigt.

2) Physikalische Zeitschr., 11. Jahrg., 1910, S. 645.

Zinke der Gabel B zur Klemme l, die mit dem zweiten Pol der Batterie verbunden ist. Im Moment des Stromschlusses wird in den Eisenkernen der Spulen Magnetismus erzeugt, die Zinken werden von den Elektromagneten angezogen, und die Platinspitze i tritt aus dem Quecksilber heraus. Damit ist der Strom geöffnet, der Magnetismus verschwindet, die Schenkel der Gabel nähern sich einander wieder. Dies hat aber zur Folge, daß die Platinspitze wieder in das Quecksilber eintaucht, worauf der ganze Vorgang sich wiederholt.

Wie man mit Hilfe einer solchen Gabel eine zweite, eventuell in einem anderen Zimmer befindliche in Schwingungen versetzen kann, wobei aller-

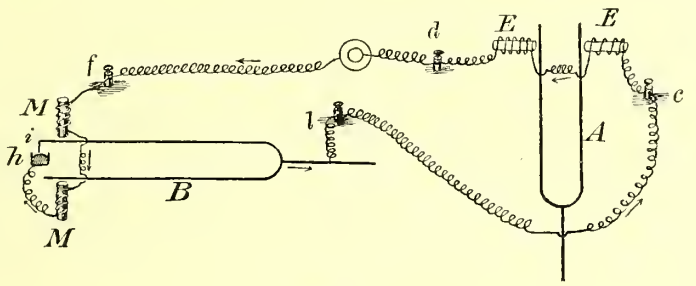


Fig. 15.

dings Voraussetzung ist, daß die Schwingungszahlen beider Gabeln genau unison sind oder die zweite Gabel einen harmonischen Oberton der erregenden gibt, geht aus der schematischen Zeichnung Fig. 15 hervor. Der Unterschied gegenüber der vorhergehenden Abbildung ist der, daß der Strom von l nicht direkt zur Batterie zurückkehrt, sondern erst vermittelst der

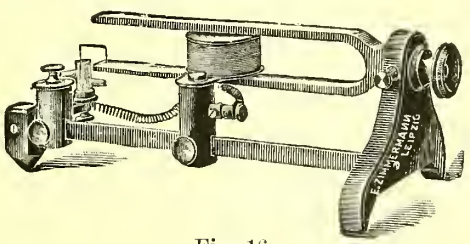


Fig. 16.

Klemmen c und d die Elektromagnete EE umkreist, welche im Tempo der Stromunterbrechungen bei i die Zinken der Gabel A anziehen und freigeben. Bekanntlich hat Helmholtz auf solche Weise seine berühmten Versuche über die Synthese von Vokalen aus (möglichst) einfachen Tönen bewerkstelligt.

Um zu vermeiden, daß das Quecksilber durch die bei den Unterbrechungen des Stromes entstehenden elektrischen Funken verbrannt wird, hat schon Helmholtz empfohlen, Alkohol auf die Quecksilberoberfläche zu gießen. Neuerdings bedient man sich mit Vorliebe einer Spülung mit fließendem (Leitungs- oder destilliertem) Wasser, indem man das Glasgefäß

h mit einer Zu- und einer Ablauföffnung, die mit Schläuchen verbunden werden, versieht. Auch begnügt man sich vielfach damit, nur einen Elektromagneten und zwar dann zwischen den Zinken anzubringen, und verwendet häufig statt des Quecksilberkontaktes einen solchen aus Platin. Fig. 16[1]) zeigt eine derartige moderne elektrische Gabel von sehr zweckmäßiger Konstruktion. Dieselbe besitzt einen auswechselbaren Platin- und Quecksilberkontakt, welche beide gegen den zuleitenden Platindraht einstellbar sind. Elektromagnet und Kontakte laufen auf einer prismatischen Stange und können der Länge der Gabel entsprechend verstellt werden, so daß selbst bei stärkstem Strom ein Aufschlagen der Zinken auf den Magneten vermieden wird. Die Ansätze des Quecksilbergefäßes für die Spülung sind in der Zeichnung sichtbar. Das Gefäß ist zwecks Entleerung und Reinigung von seinem Träger abnehmbar. Die Tonhöhe läßt sich durch Laufgewichte variieren. Auch können in dem Gestell Gabeln von beliebiger Schwingungszahl befestigt werden; jedoch wird der elektrische Antrieb um so schwieriger, je höher der Ton der Gabel ist, so daß etwa 500 Doppelschwingungen in dieser Beziehung im allgemeinen die Grenze des Erreichbaren bilden.

Durch den bei der elektromagnetischen Erregung auf die Gabel ausgeübten Zwang wird auch die Tonhöhe beeinflußt. Hinsichtlich der hier in Betracht kommenden Einzelheiten sei auf die Darstellungen von Auerbach[2]) und von Kielhauser[3]) verwiesen.

Dort findet der Leser zugleich das bis jetzt über die Abnahme der Stimmgabel-Tonhöhe mit wachsender Temperatur Bekannte zusammengestellt. Hier genügt es zu erwähnen, daß diese Abnahme ungefähr $^1/_{10000}$ der Schwingungszahl für je 1^0 C beträgt und daher bei feineren Untersuchungen in Rechnung zu ziehen ist, zumal wenn es sich um höhere Gabeln handelt. Die folgende, aus Auerbachs Akustik entlehnte Tabelle veranschaulicht die Änderung der Tonhöhe mit der Temperatur.

Temp.	Schwingungszahlen							
0^0	32	64	128	256	435	512	1024	2048
5^0	31,98	63,97	127,93	255,86	434,77	511,73	1023,5	2046,9
10^0	31,97	63,93	127,86	255,73	434,54	511,46	1022,9	2045,8
15^0	31,95	63,90	127,80	255,59	434,31	511,19	1022,4	2044,7
20^0	31,94	63,86	127,73	255,46	434,08	510,91	1021,8	2043,7
30^0	31,90	63,80	127,59	255,19	433,62	510,37	1020,8	2041,5

Ergänzend ist zu diesen Angaben zu bemerken, daß der Ausgleich zwischen der Temperatur der Gabel und derjenigen der umgebenden Luft nur langsam stattfindet, weshalb man nach R. Koenig der Gabel nur dann mit Sicherheit die vom Zimmerthermometer angegebene Temperatur zu-

1) Entnommen aus dem Katalog der Präzisionsmechanischen Werkstatt von E. Zimmermann, Leipzig, Emilienstr. 21, und Berlin N. 4, Chausseestr. 6.

2) Winkelmanns Handbuch d. Physik, Bd. II: Akustik, Kap. V, A. 3.

3) Die Stimmgabel, Leipzig 1907, III. Abschnitt.

schreiben kann, wenn diese mehrere Stunden hindurch unverändert geblieben ist[1]).

Die Methoden zur Bestimmung der Intensität eines Stimmgabeltones und ihrer Abnahme während des Ausklingens der Gabel werden im Zusammenhange mit der Hörschärfemessung erörtert werden. An dieser Stelle sei aber noch einer Eigentümlichkeit der Stimmgabeln gedacht, die ebenfalls zu der Intensität in enger Beziehung steht und als die Selbstinterferenz der Gabeln bezeichnet werden könnte.

Wenn man eine Gabel vor dem Ohre um ihre vertikal gehaltene Längsachse herumdreht, so wird der Ton jedesmal schwach oder erlischt auch ganz, wenn eine Kante der Zinken vor dem Gehöreingang vorüberkommt, während er sehr laut ist, sobald die äußere Fläche der einen Zinke oder eine der beiden Seitenflächen der Gabel dem Ohre zugewendet wird. Die Ursache dieser, unter anderen namentlich von Kießling[2]) untersuchten Erscheinung liegt darin, daß beim Gegeneinanderschwingen der Zinken zwischen diesen eine Luftverdichtung, an ihren äußeren Flächen aber eine Luftverdünnung entsteht, also Bewegungen von entgegengesetzter Phase, und daß beim Auseinanderschwingen der Zinken der gleiche Gegensatz nur mit umgekehrtem Vorzeichen besteht. Dazu kommt, daß die von der einen Zinke hervorgerufenen Lufterschütterungen teils von der anderen Zinke reflektiert werden, teils sich mit den von der letzteren ausgehenden durchkreuzen. Alle diese Bewegungen setzen sich durch Interferenz so zusammen, daß an gewissen Punkten in der Umgebung der Zinken eine mehr oder weniger vollständige Schallvernichtung eintritt. Der geometrische Ort für diese Punkte ist annähernd die Mantelfläche eines hyperbolischen Zylinders, dessen Seiten parallel den Zinken verlaufen. Schneidet man diesen Zylinder durch eine zur Stimmgabellängsachse senkrechte Ebene, so erhält man als Schnittlinie eine Hyperbel, deren Brennpunkte in den Kanten der Gabel gelegen sind (Fig. 17).

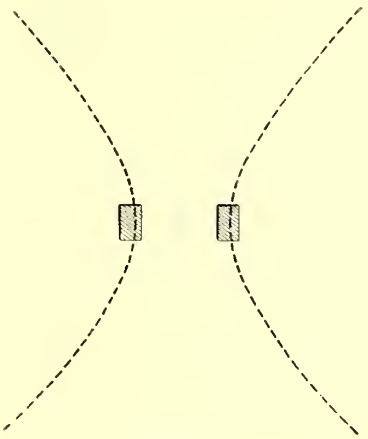


Fig. 17.

Bringt man das Ohr in eine der Interferenzflächen und schiebt über die eine Gabelzinke eine enge Röhre mit der Vorsicht, daß sie die schwingende Zinke nicht berührt, so wird der Schall sogleich lauter, weil die Interferenzwirkung gestört wird. Aus demselben Grunde wird der Ton stärker, wenn man ein Kartenblatt in die Gegend der einen oder anderen Interferenzfläche bringt oder die Gabel mit der Zinkenaußenfläche einer festen Wand nähert. Auch die Intensitätssteigerung, die eine Gabel erfährt, wenn man sie vor ein Loch einer Seebeckschen Sirene hält, und die bei

1) Daß man eine für Zimmertemperatur geeichte Gabel, wo es auf Konstanz der Tonhöhe ankommt, während des Experimentierens nicht in der warmen Hand halten darf, braucht wohl kaum erwähnt zu werden.

2) Poggendorfs Annalen d. Phys. u. Chem. Bd. 130, S. 177 ff., 1867.

rotierender Scheibe die Veranlassung zur Entstehung der Variationstöne gibt, gehört hierher.

Wo es durchaus auf die Konstanz der Intensität eines dem Ohre zugeleiteten Gabeltones ankommt, ist die Selbstinterferenz eine unerwünschte Eigenschaft, sofern man die Gabel frei in der Hand vors Ohr hält. Die kleinste unbewußte Drehung des Kopfes oder der Hand kann unkontrollierbare Änderungen der Empfindungsstärke hervorrufen. In solchem Falle ist es darum besser, die Gabel in bestimmter Stellung vor der Öffnung einer Schallröhre, deren anderes Ende ins Ohr führt, zu fixieren.

c) Saiten.

Eine Saite kann man bekanntlich in Transversal-, Longitudinal- und Torsionsschwingungen versetzen. Während die Torsionstöne für die physiologische wie für die musikalische Akustik gänzlich irrelevant sind, haben die Longitudinaltöne, mit denen man bequem und sehr hoch in der Tonskala hinaufkommen kann, neuerdings eine wesentliche Bedeutung für Versuche und otiatrische Beobachtungen in der Gegend der oberen Hörgrenze gewonnen, wovon an anderer Stelle eingehender die Rede sein wird. Für die mittlere Tonregion kommen nach wie vor die Transversaltöne allein in Betracht.

Zu Transversalschwingungen veranlaßt gibt eine Saite ihren Grundton und die Reihe der harmonischen Obertöne. Wie groß die Zahl der letzteren ist und in welchem Verhältnis die Intensitäten der Teiltöne des Gesamtklanges zueinander stehen, also mit einem Worte die Klangfarbe, wird vom Material der Saite und der Art ihrer Erregung — je nachdem diese durch Schlagen, Streichen, Reißen oder Zupfen geschieht — bedingt; auch die Stelle, an der man die Saite in Bewegung setzt, ist von Einfluß, insofern alle diejenigen Teiltöne nicht zustande kommen können, die gerade an diesem Punkte einen Schwingungsknoten haben. Dünne Metallsaiten klingen klimpernd wegen der hohen Obertöne, deren Zahl mit zunehmender Dicke und Kürze der Saite sich verringert. Bei den Darmsaiten werden die Teiltöne, namentlich die höheren, infolge der geringeren Elastizität relativ schnell gedämpft.

Reißt man eine Saite mit einem harten Stift oder schlägt man sie mit einem kantigen metallenen Hammer, so ist der Klang scharf und teilweise leer. Am kräftigsten hört man, worauf schon Helmholtz aufmerksam machte, den Grundton, auf den es ja in der Regel hauptsächlich ankommt, beim Zupfen mit dem weichen Finger, wobei der Ton voll und doch harmonisch klingt. Bei längeren und ziemlich dünnen Metallsaiten habe ich auch das Anschlagen mit einem langstieligen und darum gut federnden, keilförmig angeschärften Korkhammer recht zweckmäßig gefunden, jedenfalls viel günstiger als das Streichen mit dem Bogen, das hierbei häufig sehr unreine Töne erzeugt. Kurze Saiten dagegen streicht man besser an. Wo immer man aber den Bogen benutzt, muß man im Auge behalten, daß bei kräftigem Strich der Ton etwas in die Höhe steigt, woran die vom Druck des Bogens bewirkte Verlängerung, Durchbiegung und Spannungszunahme der Saite schuld sein dürfte.

Wenn eine Saite ihren Grundton gibt, schwingt sie als Ganzes zwischen ihren Endpunkten hin und her. Beim ersten Oberton, dem zweiten Partialton, der die Oktave des Grundtones ist, bildet die Saite in der Mitte einen Schwingungsknoten; beim zweiten Oberton (3. Partialton), der Duodezime des Grundtones, wird die Saite durch zwei Knoten in drei Teile zerlegt usw. Meist ist, wie erwähnt, eine größere oder geringere Anzahl solcher Teilschwingungen gleichzeitig vorhanden [1]). Berührt man während der Erregung der Saite den Mittelpunkt lose mit dem Finger, so erklingt statt des Grundtones die Oktave. Auf die gleiche Weise, also durch Dämpfung der Saite in einem der betreffenden Knotenpunkte, sogenanntes Flageolettieren, kann man auch noch höhere Obertöne in überwiegender Stärke, obwohl kaum völlig frei von harmonischen Nebentönen, hervortreten lassen. Eine andere Methode, eine bestimmte Teilschwingung einzuleiten, besteht darin, eine mit eben diesem Partialton unison klingende Stimmgabel mit der Saite in Kontakt zu bringen. Umgekehrt veranlaßt auch eine schwingende Saite eine mit ihrem Stiel auf den einen Saitenendpunkt gesetzte Gabel von derselben Tonhöhe zum Mitschwingen. Letztere Erscheinung, die ich bei ganz kurzen Saiten ebenso deutlich gefunden habe wie bei längeren, kann gelegentlich zu einer bequemen, aber freilich nicht mathematisch genauen Kontrolle der Stimmung der Saite dienen.

Die Mannigfaltigkeit der Töne, die eine einzige Saite zu erzeugen vermag, bildet zweifellos einen Vorzug gegenüber den Stimmgabeln. Bringt man zwischen den Endpunkten einen längs der Saite verschiebbaren Steg oder eine Klemmbacke an, so kann man durch sukzessive Verkürzung der Saite immer höher werdende transversale Grundtöne hervorbringen und nimmt man zu diesen Transversaltönen die noch höheren Longitudinaltöne, deren Schwingungszahlen ebenfalls proportional der Verkürzung wachsen, hinzu, so läßt sich leicht mit einer einzigen Saite eine kontinuierliche Tonreihe herstellen, die von der oberen Hörgrenze bis zu den tiefen Oktaven hinabreicht [2]).

Die tiefen und mittelhohen Töne einer frei durch den Raum ausgespannten Saite sind schwach hörbar, weil die Luft leicht um den dünnen Körper hin und her schlüpft und nur unbedeutende Verdichtungen und Verdünnungen erfährt. Man befestigt darum die Saite meist über einem Resonanzkörper oder veranlaßt wenigstens, daß ihre Schwingungen auf eine Tischplatte und von da aus an die umgebende Luft übertragen werden. So entstehen jene Apparate, die als Monochord, Dichord oder Polychord bezeichnet werden, je nach der Zahl der Saiten. Eine einfache Konstruktion dieser Art zeigt uns Fig. 18a. Über einen Schallkasten sind zwei Saiten gezogen, deren schwingende Teile durch die beiden Stege a und b begrenzt werden. Die hintere Saite wird mittelst des Stimmstockes s, die vordere durch die Gewichte P gespannt. Um eine der Saiten zu verkürzen, ohne zugleich ihre Spannung zu ändern, bedient man sich des beweglichen Steges

1) Durch Ankleben von nur ein wenig Wachs an irgendeinem Punkte der Saite wird das Verhältnis der Teiltöne zueinander in ein unharmonisches verwandelt.

2) Vgl. K. L. Schaefer, Über eine Erweiterung der Anwendbarkeit des Struyckenschen Monochords; Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. des Ohres usw. Bd. 4, S. 376, 1911.

Fig. 18b, indem man die Saite zwischen dem Fußstück ns und dem Deckel pr einklemmt. Die klemmenden Flächen sind mit weichem Leder belegt, wodurch verhindert wird, daß sich die Schwingungen auf das nicht benutzte Saitenstück übertragen. Fig. 19 ist das Dichord von C. Spearman, eine

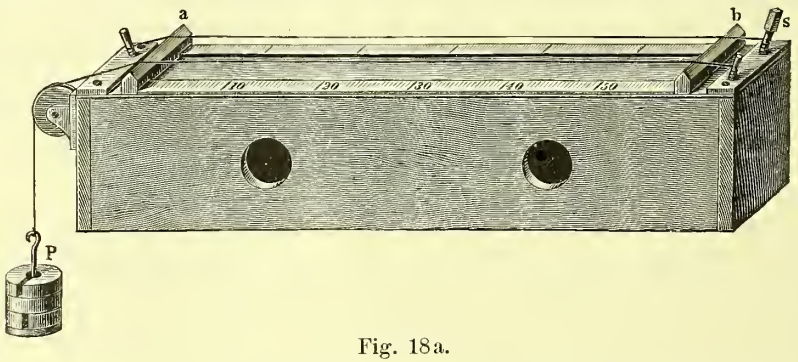


Fig. 18a.

Originalkonstruktion der Firma Fritz Köhler, Universitätsmechaniker in Leipzig. Die zwischen zwei feststehenden Wirbeln c und Endstegen d ausgespannten Saiten werden mittelst des beiliegend gezeichneten Schlüssels b gestimmt und mittelst eines Zupfers a erregt. Zwischen den Endstegen besitzt jede Saite noch zwei voneinander unabhängige verschiebbare Stege e. Man hat somit, indem man stets das zwischen einem Endstege und dem näher liegenden beweglichen Stege befindliche Saitenstück benutzt, vier unabhängige und variable Töne zur Verfügung. Auf dem Grundbrett angebrachte Skalen erlauben, genaue Einstellungen sowie die Schwingungszahlen bequem abzu-

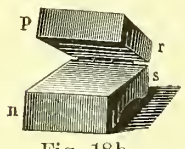


Fig. 18b.

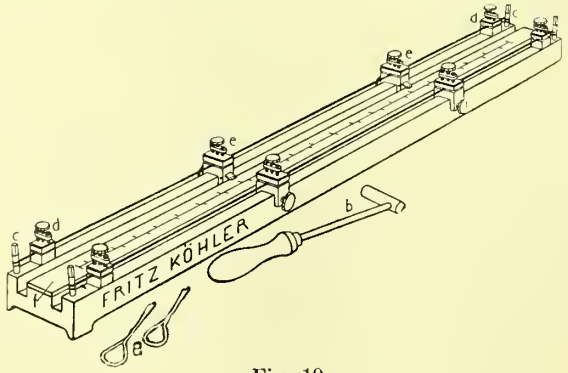


Fig. 19.

lesen. Die Anbringung eines Nonius ermöglicht es, Intervalle bis auf $^1/_{20}$ Schwingung Differenz herzustellen. Fig. 20 stellt in $^1/_9$ der natürlichen Größe eine Abbildung des Polychords nach Prof. K. Antolik-dar, zu beziehen vom Präzisionsmechaniker Max Kohl in Chemnitz. Das

selbe besitzt 12 Saiten, die sich durch Preßbacken, an seitlichen Schienen angebracht, in jeder Verkürzung benutzen und somit zu zahlreichen Demonstrationen, insbesondere über musikalische Skalen, verwenden lassen.

Ein entschiedener Übelstand bei der Benutzung von Saiten ist der, daß sie die ihnen einmal durch Spannung erteilte Tonhöhe nicht in dem Maße wie die Stimmgabeln bewahren. Infolge des sehr ungleichmäßigen Einflusses der elastischen Nachwirkung, der Temperatur und der Feuchtigkeit muß man stets mit Verstimmungen rechnen und daher die Tonhöhe, wo es auf deren Genauigkeit ankommt, immer wieder kontrollieren. Hierzu ist aber die Vergleichung mit einer Tonquelle von exakt bestimmter und konstanter Schwingungszahl nötig. Denn man kann sich auch nicht etwa auf die

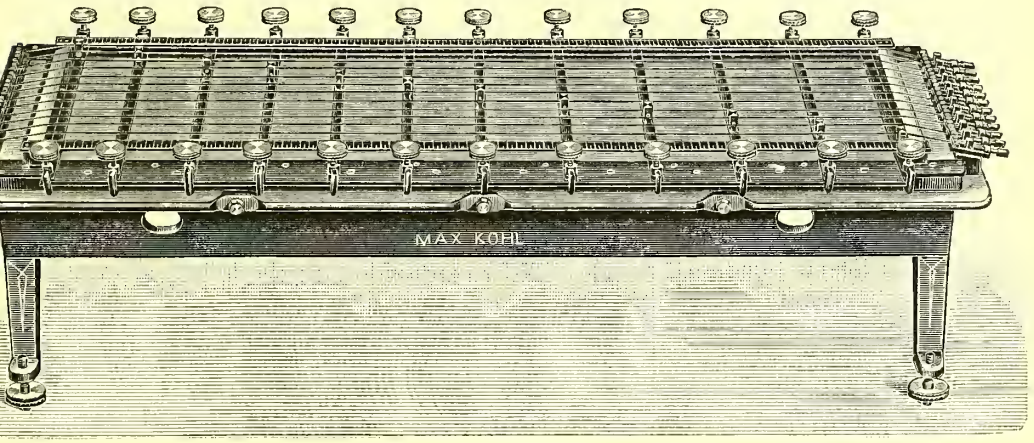


Fig. 20.

Taylorsche Formel ohne weiteres verlassen. Dieser zufolge ist zwar, wenn N die Schwingungszahl, p das spannende Gewicht, g die Beschleunigung durch die Schwere, l die Länge, q den Querschnitt und s das spezifische Gewicht der Saite bedeutet,

$$N = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{p \cdot g}{q \cdot s}}$$

und mithin bei einer und derselben durch einen Steg beliebig abgrenzbaren Saite, solange die Spannung nicht absichtlich oder durch Temperatureinflüsse geändert wird, die Schwingungszahl einfach umgekehrt proportional der Länge; indessen geht ein nicht so leicht angebbarer Teil der Spannung durch Reibung an den Stegen und der eventuell für das spannende Gewicht angebrachten Rolle verloren. Ferner kommt in Betracht, daß sich der Querschnitt mit der Spannung ändert und daß die mit der Dicke oder der Verkürzung der Saite zunehmende Steifigkeit im Sinne einer Spannungszunahme wirkt. Diese sekundären Einflüsse können relativ beträchtliche Abweichungen von dem Formelwert der Schwingungszahl zur Folge haben. So habe ich, um nur ein Beispiel zu bringen, bei meinen eben zitierten Versuchen über

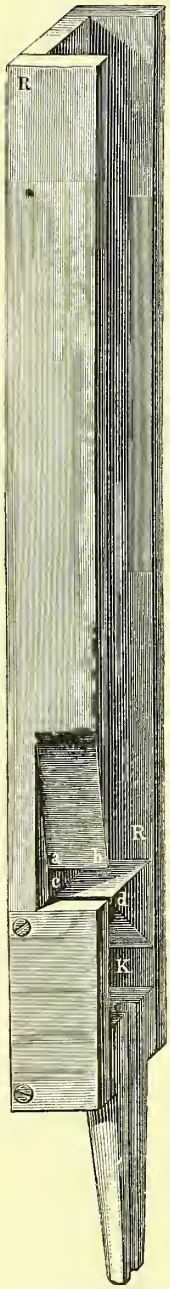


Fig. 21A.

Fig. 21B.

die Transversaltöne des Struyckenschen Monochords[1]) gefunden, daß die Saite des von mir benutzten Exemplares, wenn man sie mittelst des Steges auf 4 cm verkürzt, ein tiefes h^4 anstatt eines hohen a^4, wie es dem Taylorschen Theorem unter den gegebenen Bedingungen entsprechen würde, hören läßt.

d) Labialpfeifen und Gebläseeinrichtungen.

Die Lippenpfeifen der Orgel, die entweder aus Holz oder aus Metall verfertigt werden, spielen auch im Instrumentarium der physiologischen Akustik eine nicht unbedeutende Rolle. Sie werden dadurch zum Erklingen gebracht, daß durch einen schmalen Schlitz ein bandförmiger Luftstrom gegen den scharfkantigen Rand der Öffnung eines parallelepipedonischen oder zylindrischen, mit Luft erfüllten Hohlraumes geblasen wird. Die Figuren 21 *A* und *B* versinnlichen die einfache Bauart. *A* ist eine (oben) offene Holzpfeife im Längsschnitt, *B* eine oben geschlossene, sogenannte gedeckte oder gedackte, zinnerne Pfeife. *RR* bezeichnet die eigentliche Pfeifenröhre, deren Luftsäule durch das Anblasen in stehende Schwingungen gerät, *ab* die nach oben durch die schneidenförmig zugeschärfte Oberlippe begrenzte Mundöffnung (Aufschnitt). *K* ist die Luftkammer, in welche von unten her die Druckluft durch den hohlen Fuß *F* eindringt, um sie durch die Kernspalte *cd* als platter Luftstreifen (Luftzunge) wieder zu verlassen.

Beide Pfeifenarten, die offene und die gedackte, lassen, richtig angeblasen, einen Grundton und diverse harmonische Obertöne hören, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Klangfarbe dadurch, daß bei der offenen die lückenlose Reihe der harmonischen Teiltöne auftritt, bei der gedackten dagegen nur die ungeradzahligen Teiltöne, also Grundton, Duodezime, große

1) Nähere Beschreibung dieses Apparates im Kapitel: Bestimmung der oberen Hörgrenze.

Terz der Doppeloktave usw., entstehen und die geradzahligen, nämlich Oktave, Doppeloktave, Quinte der Doppeloktave usw., fehlen [1]). Der Grundton einer gedackten Pfeife ist (elementar-theoretisch betrachtet) um eine Oktave tiefer als derjenige einer gleich langen offenen. Denn jene gibt einen Ton, dessen Welle die vierfache Länge der Pfeifenröhre hat, während die Grundtonwelle der offenen Pfeife nur doppelt so lang ist wie *RR*.

Diese letzteren Angaben finden ihren formelmäßigen Ausdruck in der Gleichung $N = \frac{v}{2l}$, die für die offene, und der Gleichung $N = \frac{v}{4l}$, welche für die gedackte Pfeife gilt. Dabei ist unter N die Schwingungszahl, unter l die Länge des Pfeifenrohres und unter v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft zu verstehen. Die Abhängigkeit der Schwingungszahl von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist der Grund für die leichte und relativ beträchtliche Verstimmbarkeit der Lippenpfeifen. Denn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist selbst abhängig von der Temperatur der Luft derart, daß sie mit je 1° C sehr annähernd um 0,6 m wächst. Will man also die Tonhöhe einer Lippenpfeife aus ihrer Länge ableiten, so tut man gut, das Thermometer zu berücksichtigen. Die Beziehung zwischen Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Temperatur wird durch die Gleichung $v = 331{,}8 \sqrt{1 + \alpha t}$ dargestellt, worin t die Celsiusgrade und α den Ausdehnungskoeffizienten der Luft $= 0{,}00367$ bedeutet. Ich habe vor einigen Jahren sowohl die Schallgeschwindigkeiten als auch die Tonwellenlängen in Luft bei verschiedenen Temperaturen tabellarisch zusammengestellt [2]) und diese Tabellen als Anhang dem Kapitel über die Bestimmung der Schwingungszahlen beigefügt. Der Leser kann daraus entweder ohne weiteres oder durch einfache Interpolation die Tonhöhe einer gegebenen Lippenpfeife entnehmen. Gesetzt, es handle sich um eine gedackte Pfeife von 0,11 m Röhrenlänge bei 15° C, so findet man diese Zahl in Tabelle III in der Vertikalkolumne für den Ton G und in der Horizontalreihe für die 4-gestrichene Oktave; da aber 0,11 die Viertelwellenlänge ist, so steht die ganze Wellenlänge zwei Reihen höher: der gesuchte Ton ist also g^2. Wäre die Pfeife offen gewesen, so hätte 0,11 die halbe Wellenlänge bedeutet, und wir hätten die ganze Wellenlänge und damit den gesuchten Ton nur eine Reihe höher (g^3) gefunden. Will man statt der Tonhöhen in Noten Schwingungszahlen haben, so nimmt man zweckmäßig die ebenfalls dem Kapitel über Schwingungszahlenbestimmung angefügten „Tontabellen“ [3]) zu Hilfe. Hat man keine dieser Tabellen zur Hand, so reicht es für eine oberflächliche Orientierung über die Tonhöhe schließlich aus, die Zahl 342 als mittleren Wert der Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die doppelte, beziehungsweise vierfache Pfeifenlänge zu dividieren. Andererseits sind auch die Gleichungen

1) Bei verhältnismäßig weitem Querschnitt liegen die nächsten eigenen Töne der Luftmasse merklich höher als die entsprechenden Obertöne des Grundtones, und letztere werden deshalb wenig oder gar nicht verstärkt. Weite gedackte Pfeifen, namentlich wenn sie schwach angeblasen werden, geben darum den Grundton fast rein.

2) Karl L. Schaefer, Tabellen der Schallgeschwindigkeit und Tonwellenlängen in Luft bei verschiedenen Temperaturen. Passows und Schaefers Beiträge z. Anat. usw. d. Ohres usw. Bd. 1, S. 76. Auch separat erschienen im Verlage von S. Karger. Berlin, 1908.

3) C. Stumpf u. K. L. Schaefer, Tontabellen. Leipzig, J. A. Barth, 1901.

$N = \frac{v}{2l}$ und $N = \frac{v}{4l}$ selbst bei genauer Berücksichtigung der Temperatur noch nichts weniger als streng exakt. Dies rührt daher, daß bei der gedeckten Pfeife am Aufschnitt, bei der offenen sowohl am Aufschnitt wie an der oberen Mündung die Tonwelle ein Stückchen ins Freie hineinragend zu denken und daher etwas länger als das eigentliche Pfeifenrohr ist. Die Formeln müßten also lauten $N = \frac{v}{2(l+x)}$ bzw. $N = \frac{v}{4(l+x)}$. Auf die theoretischen und praktischen Versuche zur Bestimmung der Größe x und damit der sog. reduzierten Pfeifenlänge, wie wir sie Helmholtz, Wertheim und anderen verdanken, braucht hier nicht näher eingegangen zu werden; es genügt der Hinweis darauf, daß x sowohl von der Form des Aufschnittes als auch von dem Durchmesser der Pfeife und, falls es sich um eine offene Pfeife handelt, von der Gestalt der Mündung abhängt. Denn wo es auf ganz präzise Feststellung der Tonhöhe für physiologische Zwecke ankommt, muß man sich doch eines sonometrischen Kontrollmittels, am besten einer Gabel von bekannter Schwingungszahl, bedienen.

Die Tonhöhe hängt auch vom Anblasedruck ab. In welchem Maße und in welcher Weise dies der Fall ist, zeigt folgendes Beispiel, das ich einer gelegentlich angestellten Versuchsreihe entnehme. Eine offene Zinnpfeife gis^4 gab, mit einem Druck von 1 cm Wassersäule angeblasen, den Ton f^4; beim Druck 1,5 erschien gis^4; dann sprang der Ton bei geringfügiger Drucksteigerung auf b^3 herunter, um mit langsam zunehmendem Druck abermals kontinuierlich zu steigen; bei 3 cm war er schon f^4 und bei 7 cm fast, bei 10 cm genau gis^4.

Wie man sieht, darf man also den Druck nicht zu schwach nehmen. Für Pfeifen innerhalb des musikalischen Tonbereichs pflegt der Grundton sich am besten bei etwa 6 bis 12 cm Wasser zu entwickeln. Erhöht man den Druck darüber hinaus erheblich, so tritt „Überblasen" ein, d. h. statt des Grundtones erscheint die Oktave und weiterhin die Duodezime (zweite Überblasung). Bei den ganz hohen Tönen der Galtonpfeife wird der Grundton erst bei Drucken von rund 30 cm und darüber stationär.

Mit Rücksicht auf die Bedeutung, die der Anblasedruck für die Tonhöhe hat, ist es wünschenswert, jedes Gebläse mit einem Druckmesser zu versehen. Man kann dazu die von Förner 1677 für den Orgelbau erfundene Windwage verwenden. Es ist dies ein kleiner gläserner Luftbehälter, zum Teil mit Wasser gefüllt, in welches das untere Ende einer oben offenen, etwa 20 cm langen Röhre hineinreicht. An einer neben letzterer angebrachten Skala ist abzulesen, um wieviel Zentimeter das Wasser in der Röhre höher steht als außerhalb, nachdem man die Windwage mit der Gebläsevorrichtung luftdicht verbunden hat. Natürlich läßt sich an Stelle der Windwage auch ein einfaches, aus einer doppelt U-förmig gekrümmten Glasröhre verfertigtes, mit Kartonskala versehenes und mit irgendwie gefärbtem Wasser gefülltes Manometer benutzen, das man sich mit Hilfe einer Bunsenflamme leicht selbst aus einem passenden Glasrohr zurechtbiegen kann.

Will man eine Pfeife etwas höher oder tiefer stimmen, so läßt sich dies vielfach durch entsprechendes Erhöhen oder Verringern des Anblasedruckes erreichen. Eine offene Pfeife kann man auch dadurch vertiefen, daß man

die obere Mündung durch Annäherung irgend einer Fläche teilweise deckt. Durch vollständiges Zudecken wird der Ton elementar-theoretisch, wie erwähnt, um eine ganze Oktave, in Wirklichkeit um ca. einen Halbton weniger, erniedrigt. Bei offenen Zinnpfeifen bedient man sich gerne des Stimmhorns (Fig. 22a), mit dem man die Mündung sowohl zum Zweck der Vertiefung zusammendrücken (Fig. 22b) als auch zum Zweck der Erhöhung erweitern (Fig. 22c) kann.

Der Vorzug, den die Lippenpfeifen in vielen Fällen vor den Gabeln und den Saiten verdienen, beruht darin, daß der Ton beliebig lange und, sofern Temperatur und Druck durchaus unverändert bleiben, auch mit konstanter

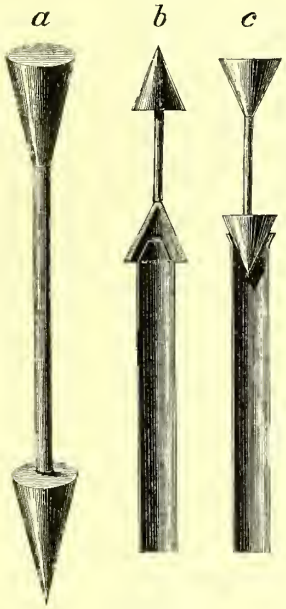


Fig. 22.

Fig. 23.

Höhe wie Stärke unterhalten werden kann. Für manche Versuche ist zugleich das Fehlen der Oktave im Klange der gedeckten Pfeifen nützlich. Ferner übertreffen die Pfeifen an Tonintensität wenigstens die tieferen Gabeln und Saiten erheblich, was ebenfalls oft erwünscht ist. Wo es auf größtmögliche Ausnutzung der Schallkraft ankommt, kann man die Pfeifenwand an der Knotenstelle des Grundtones — bei der gedeckten Pfeife liegt diese unter dem Deckel, bei der offenen in der Mitte des Pfeifenrohres — durchbohren und die Öffnung durch einen Schlauch direkt mit dem Ohre verbinden.

Das für die Tonbildung bei den Lippenpfeifen Wesentliche ist, wie oben hervorgehoben wurde, daß ein bandförmiger Luftstrom gegen den scharfen Rand einer Öffnung getrieben wird. Man kann darum schließlich fast jeden mit enger Mündung versehenen lufthaltigen Hohlraum in derselben Weise zum Tönen bringen. Es genügt zum Beispiel, das Ende eines

hohlen Schlüssels oder einer Glasröhre an den Mund zu legen und zwischen den passend geformten Lippen hindurch darüber zu blasen, um einen lauten Ton zu erzeugen. Mit einer Flasche von irgendwelcher Gestalt lassen sich ebenso Töne hervorrufen, wenn man an ihrer Mündung eine Röhre befestigt, welche am Ende platt gedrückt ist, so daß das Lumen einen schmalen Schlitz bildet, und diese dann mit einem Blasebalge in Verbindung setzt. Fig. 23 zeigt eine solche einfache Tonquelle, wie sie schon Helmholtz für seine Untersuchungen gebrauchte. An der Flasche ist mittelst des Stäbchens *c* ein Guttapercharohr *a*, das zuvor in warmem Wasser erweicht und abgeplattet worden war, angebracht. Der Ton derartiger Flaschen ist noch freier von Obertönen als der Ton einer gedeckten Pfeife und die Tonhöhe bei kleinen Änderungen der Windstärke auch leichter konstant zu halten. Allerdings muß man das Optimum der Tonbildung, das von der gegenseitigen Stellung der Flaschenmündung bd und des Anblasespalts abhängt, erst aufsuchen. Ist es gefunden, so empfiehlt es sich, Flaschenhals und Rohr, das für diesen Fall besser aus Glas oder Metall besteht, durch Eingipsen in dauernd feste Verbindung zu bringen. Rasches und ziemlich umfangreiches Umstimmen der Tonhöhe ist leicht durch Ein- oder Auslassen von Wasser zu erzielen, weshalb es zweckmäßig ist, Flaschen mit einem Hahn am Boden zu benutzen. Man kann auch nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren die Flasche mit einer zweiten, mit Wasser gefüllten verbinden und durch Heben oder Senken der letzteren die Umstimmung vollziehen. Soll der Ton einer Flasche ein für allemal eine bestimmte Höhe behalten, die oberhalb des Eigentones liegt, so gieße man ein entsprechendes Quantum von geschmolzenem Wachs oder einer ähnlichen erhärtenden Substanz hinein, wobei man aber stets den etwaigen allmählichen Schwund der Masse durch Eintrocknen in Rechnung ziehen muß. Das Psychologische Institut der Berliner Universität besitzt eine aus derart abgestimmten kugeligen Glasflaschen zusammengesetzte „Flaschenorgel", die vor einigen Jahren auf Anregung von Prof. C. Stumpf durch die Herren Max Meyer und Orgelbauer Dinse in Berlin konstruiert ist und mehrere Oktaven umfaßt.

Wo es auf rasche und bequeme Veränderung der Tonhöhe um größere Beträge ankam, bediente man sich früher ausschließlich der sogenannten Stempelpfeifen, hölzerner Pfeifen, deren Länge sich durch einen im Inneren des Pfeifenrohres luftdicht hin und her verschieblichen Stempel variieren läßt, auf dem zugleich die den einzelnen Einstellungen entsprechenden Tonhöhen in Halbtönen markiert zu sein pflegen. Fig. 24 gibt eine solche Pfeife anschaulich wieder. Bei weitem vorzuziehen, und zwar unter anderem wegen der größeren Reinheit und Weichheit der Töne, ist jedoch meines Erachtens der aus angeblasenen Flaschen mit veränderlichem Lumen bestehende Tonvariator von L. William Stern, der in der Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane[1]) genauer beschrieben und vom Präzisionsmechaniker Max Kohl in Chemnitz zu beziehen ist. Die Konstruktion erläutert das Schema Fig. 25. Jede Flasche besteht aus einem Messingzylinder *C*, dem eine aus Zinkguß gedrehte, mit offenem Halse versehene Kappe *K* aufgelötet ist. Der Boden wird durch einen metallenen

1) Bd. 30, S. 422, 1902.

Kolben *Kb* gebildet, der sich vermittelst einer eingeölten Filzumhüllung *F* durchaus luftdicht dem Innern des Zylinders anschmiegt und leicht in ihm gleiten kann. Die vorn zu einem schmalen Schlitz verengte Lufzuführungsröhre *A* ist an der Flasche durch einen mit Gelenk versehenen Halter beweglich befestigt, da das Optimum ihrer Stellung zur Flaschenmündung mit der Tonhöhe sich etwas ändert. Die Kolbenführungsstange *St* ruht mit der Rolle *R* auf dem Rande einer eigentümlich geschnittenen, senkrecht stehenden massiven Metallscheibe, durch deren Drehung um ihre in der Figur angedeutete Achse nach links oder rechts der Kolben gehoben oder gesenkt wird. Die spiralige Form der „Steigkurve" soll dem Umstande ausgleichend

Fig. 24.

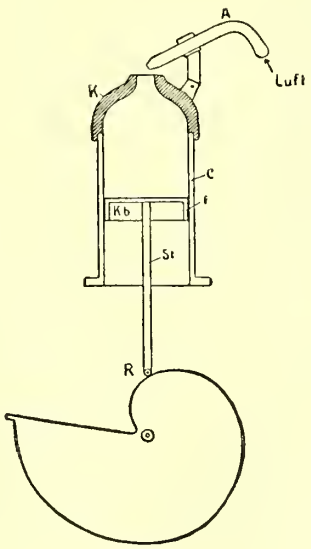


Fig. 25.

Rechnung tragen, daß die Geschwindigkeit, mit der die Tonhöhe sich bei stetiger Kolbenhebung ändert, ungleichmäßig ist, indem eine Hebungsstrecke, die in der unteren Region der Flasche etwa 1 Schwingung Tonerhöhung bewirkt, in der Nähe des Halses gegen 20 Schwingungen bedeuten kann. Durch die Steigkurve wird sehr annähernd eine gleichmäßige Geschwindigkeit der Tonveränderung bei gleichmäßiger Drehung der Scheibe erreicht, was besonders für gewisse psychologische Versuche von Bedeutung ist. Der Tonvariator hat im Laufe der Zeit diverse konstruktive Veränderungen erfahren. Die neuesten Formen sind auf Seite 256 in den Figuren 26a (Größenverhältnis 1:4), 26b (Größenverhältnis 1:7) und 26c (Größenverhältnis 1:4) abgebildet. Die Schwingungszahlen lassen sich direkt an einem Zifferblatte ablesen. Die Eichung geschieht seitens der Fabrik bei gleichmäßigem Winddruck von bestimmter Stärke. Um den Druck beim An-

blasen während des Experimentierens beobachten zu können, wird die Flasche (vgl. Fig. 26b) mit einem Monometer ausgerüstet, auf dessen Skala der Druck, bei dem der Variator justiert wurde, markiert ist. Fig. 26c ist eine einfachere, hauptsächlich für Demonstrationszwecke bestimmte, aber auch für viele wissenschaftliche Versuche genügende Ausführung des Apparates, bei der die Verschiebung des Pfeifenbodens an Stelle der Spirale durch Zahn und Trieb erfolgt und ein exzentrisch betätigter Zeiger die ent-

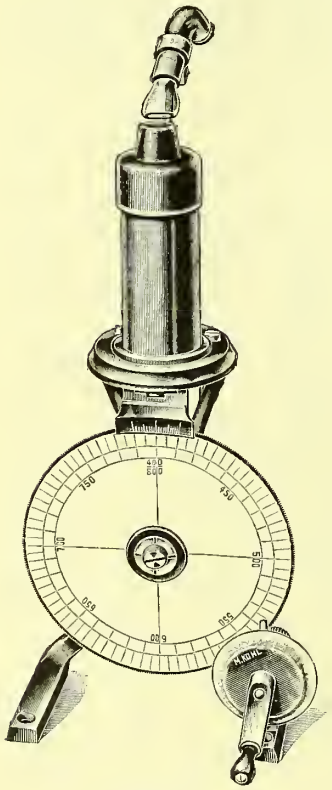


Fig. 26a.

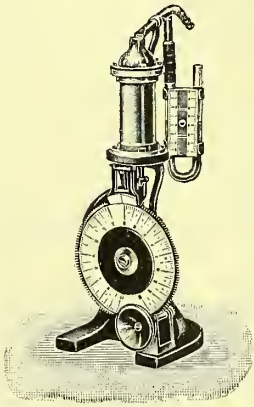


Fig. 26b.

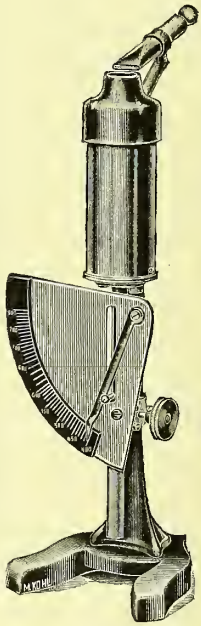


Fig. 26c.

sprechenden Schwingungszahlen auf einer Skala angibt. Der Tonvariator als Ganzes besteht aus 7 — auch einzeln oder in beliebiger Kombination käuflichen — Flaschen. Die Schwingungszahlenbereiche derselben sind der Reihe nach: 100—165, 150–300, 200—400, 300—600, 400—800, 500—1000, 600—1200. — In seiner oben erwähnten Abhandlung hat Stern ganz besonderes Gewicht auf die Möglichkeit äußerst feiner Tonhöhenänderung gelegt. Ich möchte aber doch eine Warnung vor übertriebenem Vertrauen auf die Konstanz und minutiöse Abstufbarkeit der jeweils eingestellten Tonhöhe nicht unterlassen. Mangelhaft physikalisch geschulte Versuchspersonen, die mit dem Tonvariator arbeiten, vergessen leicht, daß einer und derselben Einstellung je nach der Temperatur mehr oder weniger verschiedene Ton-

höhen entsprechen können, und das bis auf Schwingungsbruchteile genaue Innehalten einer Tonhöhe ist bei der Benutzung eines der meist üblichen Gebläse wegen der unvermeidlichen Druckschwankungen höchst fragwürdig.

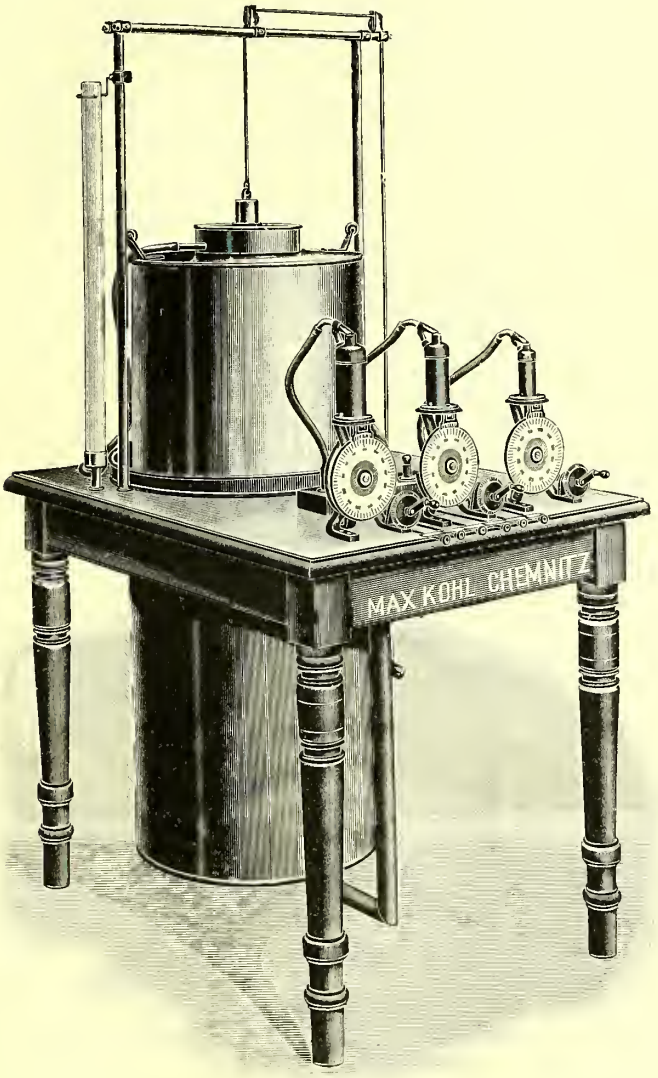


Fig. 27.

Im übrigen ist indessen der Sternsche Apparat so bequem und vielseitig brauchbar, daß er in keinem akustischen Instrumentarium fehlen sollte. Er stellt eine kontinuierliche Tonreihe dar, bei der alle Tonhöhen ohne Pause in beliebigem Tempo mit gleichmäßiger Geschwindigkeit durchlaufen und

die verschiedensten Zwei- und Dreiklänge, Schwebungen, Kombinationstöne, Konsonanzen und Dissonanzen erzeugt werden können.

Die Firma Max Kohl empfiehlt für die Betätigung des Sternschen Apparates eine aus Tonflaschen, Experimentiertisch und gasometerähnlichem Gebläse kombinierte Einrichtung, die in Fig. 27 abgebildet ist. Der in Wasser tauchende innere Teil des Kessels wird durch Zug an der über die beiden Rollen gleitenden Schnur gehoben, wobei der Kessel sich durch Öffnung des oben befindlichen Ventils mit Luft füllt. Sobald der Zug aufhört, schließt sich das Ventil durch Federkraft, und wenn dann einer der Schieber der hinter den Pfeifen sichtbaren Windlade, welche mit dem Wind-

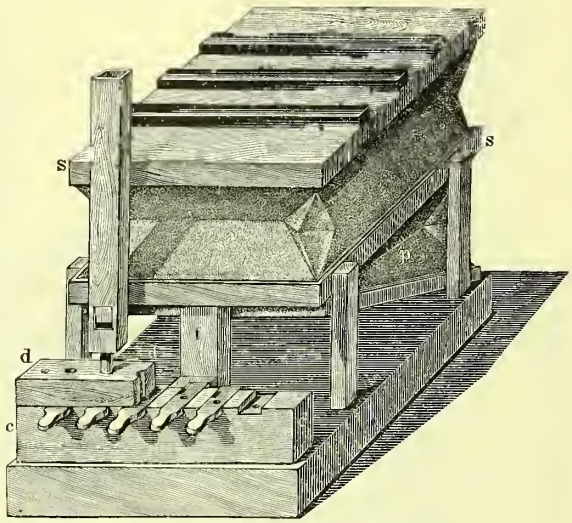


Fig. 28.

raum im Kessel durch das unter dem Tisch verlaufende gebogene Rohr verbunden ist, geöffnet wird, so strömt die Preßluft unter dem Druck des absinkenden Kesseloberteiles zu der betreffenden Flasche. Aus dem Glasrohr neben der linken Führungsstange läuft während des Absinkens Wasser in ein flaches Gefäß, das mitten auf dem Kesseldach angebracht ist. Dadurch soll der beim Niedergehen des Kessels eintretende Gewichts- und Druckverlust ausgeglichen werden. Dies ist auch, wie ich manometrisch festgestellt habe, sehr annähernd der Fall. Indessen zeigt der Druck fortwährende Schwankungen, die anscheinend von der Reibung der Rollen an den Führungsstangen (s. d. Fig.) herrühren und eine absolute Konstanz der Tonhöhe während des Versuches unmöglich machen. Mit diesem Gebläse erzeugte hohe Galtonpfeifentöne schwanken, wie ich an Differenztönen gelegentlich beobachten konnte, um Hunderte von Schwingungen hin und her.

Ich ziehe daher diesem und dem ähnlich gebauten Whippleschen Doppelgebläse die gewöhnlichen Blasebälge vor, bei denen überdies die umständliche Wasserfüllung fortfällt. Es gibt Blasebälge für Hand und Fußbetrieb. Die letzteren sind natürlich bequemer, insofern bei ihrer Be-

nutzung die Hände zum Experimentieren frei bleiben. Der Blasebalg muß so groß sein, daß man während des Absinkens Zeit genug zum Beobachten behält. Denn durch das Pumpen zwecks Nachfüllens werden stets erheblichere Druckschwankungen hervorgerufen. Bevor man einen Blasebalg in Gebrauch nimmt, soll man ihn auf seine Druckverhältnisse mittelst eines Manometers prüfen und nur dann behalten, wenn die Wassersäule des letzteren während des Blasens sich auf gleicher Höhe hält und nicht etwa auf und ab schwankt oder kontinuierlich um diverse Zentimeter steigt. Die Funktionsweise eines Blasebalges mit Windlade geht aus Fig. 28 hervor. Durch die Pumpbewegungen des Schöpfbalges *p* wird der Balg *ss* gefüllt. Der Druck des Deckels, der eventuell durch aufgelegte Eisenplatten erhöht

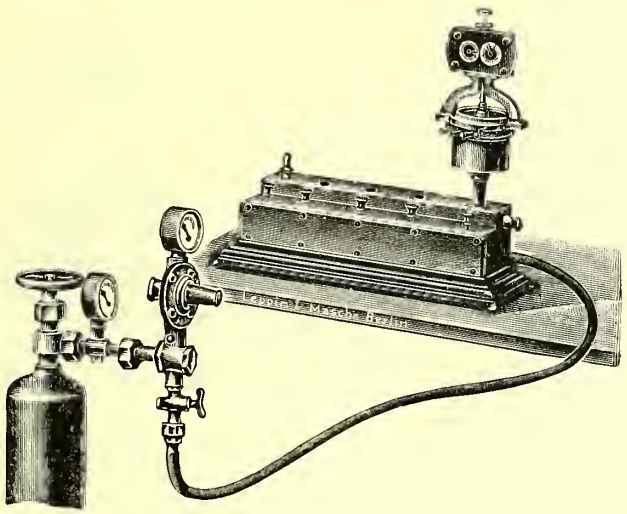


Fig. 29.

werden kann, treibt die Luft durch die Röhre *f* in die Windlade *cc*. Von hier aus führen (vgl. die Zeichnung rechts) mit Hilfe von Schiebern absperrbare, durch den oberen Teil *dd* verlaufende, vertikale Kanäle die Preßluft aufwärts zu den in die Kanalöffnungen einzusetzenden Pfeifenfüßen. In der Abbildung ist rechts das Oberstück der Windlade und der letzte Schieber weggenommen, um die Beziehung der eben genannten Teile der Windlade zueinander sichtbar zu machen.

Die Firma Leppin und Masche (Berlin SO. Engelufer 17) hat vor einigen Jahren empfohlen[1]), in Stahlflaschen komprimierte Luft als Betriebskraft zum Anblasen von Pfeifen oder Sirenen zu verwenden. Wie die Abbildung Fig. 29 zeigt, wird die mit einem Reduzierventil zur Drosselung des Druckes versehene Flasche einfach mittelst eines Gummischlauches mit der Windlade (die in der Abbildung eine Sirene trägt) verbunden. Solche Flaschen kann man von Leppin und Masche beziehen oder vom Preß-

1) Berichte über Apparate und Anlagen von Leppin und Masche, 1. Jahrg. Nr. 6, 1902.

luftingenieur A. Serényi in Berlin C., Kaiser Wilhelm-Str. 45. Letzterer liefert dieselben mit 4700 Liter Inhalt zum Preise von etwa 10 Mark für jede Neufüllung. Sie eignen sich vorzüglich zum Anblasen der Galtonpfeife und hoher Zinnpfeifen, dagegen für tiefere Pfeifen insofern nicht, als die Preßluft zu schnell verbraucht wird. Das Quantum Luft, dessen eine Orgelpfeife zur regelrechten Tongebung bedarf, schwankt nämlich, wie Zamminer[1]) angibt, je nach der Größe und Weite zwischen einem Kubikfuß und einigen Kubikzollen in der Sekunde. Die Benutzung von Sauerstoff oder flüssiger Kohlensäure wäre an sich rationeller, verbietet sich aber wegen der chemischen Einwirkung auf die Apparate sowie wegen des Umstandes, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalls und damit die

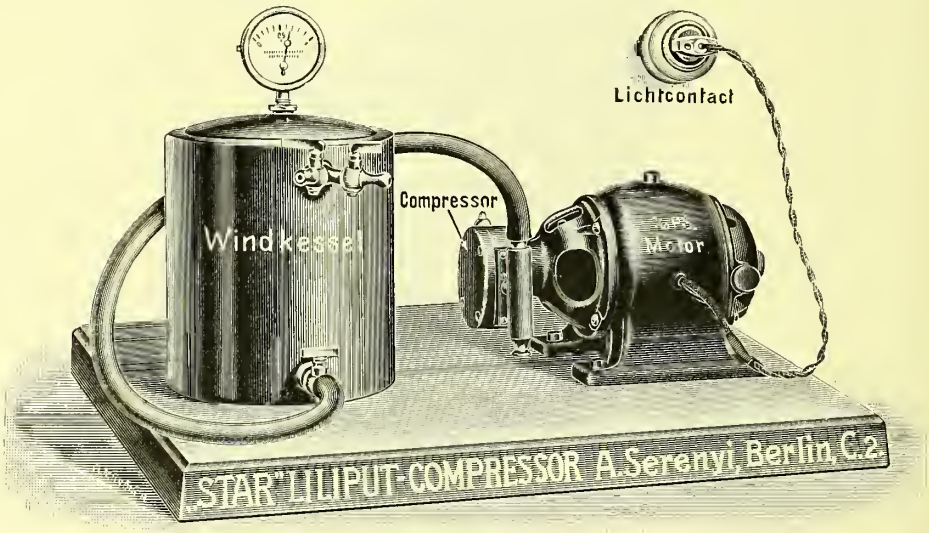


Fig. 30.

Tonhöhe sich bei der Mischung dieser Gase mit der Luft in der Pfeife mehr oder weniger ändert.

Man kann sich übrigens die Preßluft auch selbst herstellen, indem man einen Windkessel von genügendem Volumen durch eine Handpumpe mit Druckluft von entsprechender Spannung füllt. Dazu dienende Apparate sind gleichfalls von der eben genannten Firma Serényi zu beziehen.

Sehr gute Dienste zum Anblasen hoher Pfeifen, insbesondere der Galtonpfeife, leistet der Serényische „Star-Liliput-Kompressor Nr. 2“ (Fig. 30)[2]). Es ist dies eine kleine, direkt mit einem Antriebselektromotor von $^1/_{10}$ bis $^1/_8$ PS gekuppelte Rotationsluftpumpe (Turbine), die, sobald der Motor mit dem Lichtkontakt verbunden ist, den Windkessel mit Preßluft von etwas über $^1/_2$ Atmosphäre füllt. Der von mir zu Probeversuchen benutzte Kessel hatte einen Kubikinhalt von etwa $3\,^1/_2$ Liter. Den Ausfluß-

1) Die Musik und die musikalischen Instrumente; Gießen 1855, S. 245.
2) Preis 200 Mark.

hahn — in der Figur sind zwei angegeben; ich habe aber bisher nur einen Kessel mit einem solchen benutzt — verbindet man durch einen Gummischlauch direkt, d. h. ohne Windlade, mit der Pfeife. Zweckmäßig ist es, zwischen Kessel und Pfeife noch einen Bunsenschen Quetschhahn oder einen Zimmermannschen Präzisionshahn zur feineren Abstufung des Druckes und dicht vor der Pfeife ein Wassermanometer einzuschalten. Bei dieser Anordnung ist der Druck minutiös abstufbar und durchaus konstant. Durch seinen Lärm stört der Motor die durchdringenden ganz hohen und höchsten Töne nur wenig; doch läßt er sich natürlich auch in einem Nebenraum unterbringen und durch die Wand hindurch mittelst Rohrleitung mit dem Windkessel verbinden. Es ist mir mit dem Liliput-Kompressor gelungen, Lippenpfeifen bis in die große Oktave hinab zum Tönen zu bringen; nur muß man dabei mit Rücksicht auf das nötige Luftquantum einen genügend weiten Verbindungsschlauch zwischen Kessel und Pfeife nehmen. Der Versuch, Sternsche Flaschen mit dem Liliput-Kompressor anzublasen, ergab dagegen keine besonders guten Resultate.

Zum Anblasen der höheren Galtontöne ist ein möglichst konstanter Druck nötig, der sich nach Belieben bis zu 30 cm Wasser und mehr steigern läßt. Da die gewöhnlichen Blasebälge einschließlich der Kohlschen Gasometergebläse diesen Anforderungen nicht gewachsen sind, muß man sich zu dem genannten Zwecke, wenn keiner der eben erwähnten Kompressionsapparate zur Verfügung steht, eines Luftsackes oder eines Wasserstrahlgebläses bedienen.

Als Luftsack benutzt man am besten eines der in der Krankenpflege üblichen Luft- oder Wasserkissen. In die Mündung desselben wird ein Y-Rohrstück eingesetzt, dessen einer Schenkel mit einem Blasebalge und dessen anderer Schenkel mit Manometer und Pfeife in Verbindung steht; diese Verbindungen müssen durch Hähne absperrbar sein. Der Luftsack wird vom Blasebalg aus aufgepumpt und dann mit Gewichten oder schweren Gegenständen so lange belastet, bis die gewünschte Maximaldruckhöhe erreicht ist. Die Regulierung des Druckes geschieht mit Hilfe des Hahnes. Indessen ist diese Methode der Preßluftbeschaffung recht umständlich.

Das Prinzip der Wirkung eines Wasserstrahlgebläses erläutert Fig. 31. Rechts unten tritt das Wasser aus der Hausleitung ein, saugt im Vorbeiströmen durch das offene Rohr, das rechts oben in der Zeichnung sichtbar ist, Luft an und gelangt mit dieser gemischt in den Glaszylinder. Hier steigt die Luft nach oben und wird durch den Hahn links herausgedrückt, während das Wasser sich erst in dem im Innern des Zylinders befindlichen kleineren Gefäße sammelt und dann überlaufend das Gebläse nach unten verläßt. Fig. 32 ist ein Wasserstrahlgebläse einfachster Konstruktion mit Wasserkörper aus bronziertem Zinkblech, Wasserstandsrohr und Wasserabflußregulierhahn. Dasselbe wird mittelst eines Kuppelungsstückes am oberen Ende direkt mit dem Wasserleitungshahn verbunden[1]). Ich habe diesen kleinen Apparat vollkommen ausreichend zum Anblasen der Galtonpfeife gefunden; nur muß man, um die Druckschwankungen auszugleichen, zwischen Gebläse und Pfeife einen Windkessel einschalten. Ein

1) Preis alles in allem ca. 20 Mark.

Übelstand aller Wasserstrahlgebläse ist der Feuchtigkeitsgehalt der Anblaseluft, welcher auf die Dauer nachteilig für die Instrumente werden kann. Um ihn möglichst unschädlich zu machen, lasse man die Luft gleich nach dem Austreten aus dem Zylinder durch eine passend angeordnete Röhre mit Chlorkalziumstücken hindurchstreichen. Außer der Galtonpfeife konnte ich mit dem in Rede stehenden Gebläse auch noch Lippenpfeifen der höheren Oktaven bis zu c^1 hinunter zum Tönen bringen. Ein erheblich größeres

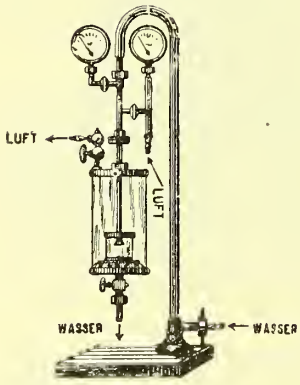


Fig. 31.

Fig. 32.

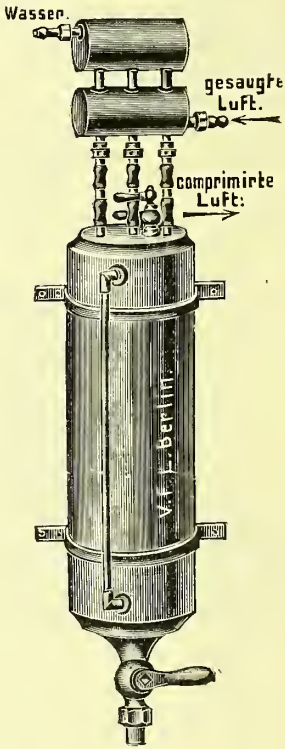


Fig. 33.

und entsprechend leistungsfähigeres, aber auch teuereres (80—100 M.) Wasserstrahlgebläse stellt Fig. 33 dar. Dasselbe wird seines lauten Geräusches wegen zweckmäßigerweise in einem Nebenraum untergebracht und die Druckluft durch eine Rohrleitung ins Experimentierzimmer überführt, woselbst dann auch der Hahn zum Anlassen des Gebläses, das mit der Wasserleitung dauernd verbunden bleibt, anzubringen ist.

e) Zungen.

Während der Tonerreger der Lippenpfeifen die unsichtbare, um die scharfe Schneide der Oberlippe hin und her pendelnde „Luftzunge“ ist, haben wir es bei den Zungenpfeifen der Orgel, des Harmoniums, der Zieh-

und Mundharmonika mit dünnen, schmalen Metallstreifen, bei der Klarinette, der Oboe und dem Fagott mit ebensolchen Rohrblättchen zu tun. Das allen diesen Instrumenten gemeinsame Prinzip der Klangbildung besteht darin, daß die Zunge aus Metall oder Rohr, durch einen an sich kontinuierlichen Luftstrom in Schwingungen versetzt, eben diesen Luftstrom durch ihre rhythmischen Oszillationen in einzelne Stöße zerlegt, welche vom Ohr als Verdichtungen und Verdünnungen, d. h. tönend, empfunden werden. Die Zungeninstrumente sind also in bezug hierauf den Sirenen verwandt. Ihr Klang ist laut und reich an Teiltönen, weil er durch die periodischen Unterbrechungen des Luftstromes hervorgerufen wird und nicht etwa unmittelbar durch die pendelförmigen Schwingungen der Zunge selbst, die vielmehr nur einen sehr leisen Ton gibt, wenn man sie durch Anschlagen oder durch Streichen mit dem Bogen statt durch Anblasen in Bewegung setzt.

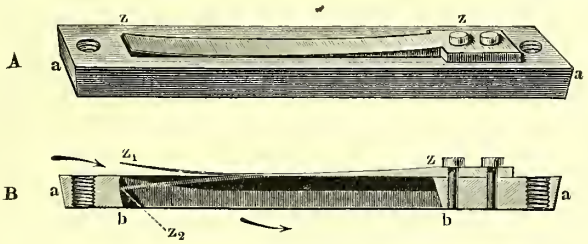


Fig. 34.

Nur die Metallzungen interessieren uns hier. Fig. 34 zeigt in A perspektivisch, in B im Durchschnitt eine auf ihrem Rahmen *aa* befestigte Zunge *zz*. Wenn dieselbe sich in Ruhe befindet, deckt sie den Hohlraum *bb* bis auf einen möglichst feinen Spalt längs ihres Randes. Zum Schwingen veranlaßt, vibriert sie zwischen den Stellungen z_1 und z_2 hin und her. In der Lage z_1 läßt sie eine Öffnung frei, durch die die Luft in der Richtung des Pfeiles einströmen kann; in der anderen Endlage z_2 ist dagegen *bb* abgeschlossen und dem Luftstrom der Weg versperrt. Die in der Abbildung dargestellte Zunge ist eine sogenannte durchschlagende. Sind die Dimensionen der Zunge größer als die des Raumes *bb*, so nennt man sie eine aufschlagende. Zungen letzterer Art geben einen sehr rasselnden Ton mit unsicherer Tonhöhe und werden deswegen in der wissenschaftlichen Akustik nicht gebraucht.

Fig. 35 macht den Bau einer Zungenpfeife der Orgel an einem Durchschnitt klar. Der unterste, kegelförmige Teil ist der Fuß, durch dessen Kanal der Wind aus der Windlade in den Stiefel *pp* eintritt. In dem Kopfe *ss* ist die Rinne *rr* (auch Kelle genannt) eingefügt, die die Zunge *l* trägt. Der unten gebogene, der Zunge fest anliegende Draht *d* ist die Stimmkrücke; wenn man diese tiefer hineinschiebt, macht man die Zunge kürzer und ihren Ton höher; zieht man sie weiter heraus, so wird der Ton tiefer. Als Fortsetzung der Rinne wird bei *v* der Aufsatz, Schallbecher oder Schallkörper eingesetzt. In der Abbildung B hat er eine konische Gestalt, kann jedoch auch zylindrisch, prismatisch oder anders geformt sein.

Zungenpfeifen wie die soeben beschriebene werden in akustischen Laboratorien eigentlich weniger zu Untersuchungen als vielmehr zu Demonstrationen verwendet. Namentlich kann man damit sehr gut die Zusammensetzung eines Klanges aus einem Grundton und diversen Obertönen zeigen oder Übungen in der Klanganalyse anstellen. Allerdings bevorzugt man hierbei vielfach eine etwas andere, von Appunn stammende Konstruktion, welche Fig. 36 widergibt. *PRUW* ist ein prismatischer Kasten von Holz,

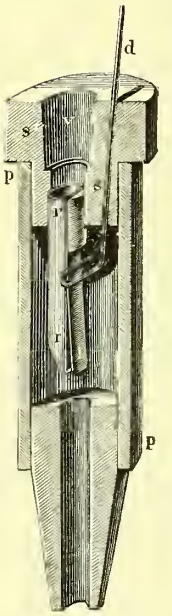


Fig. 35 A.

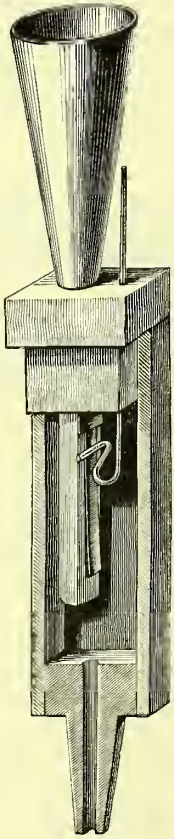


Fig. 35 B.

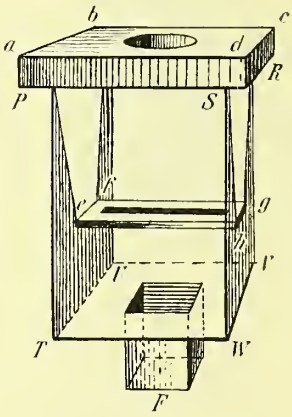


Fig. 36.

dessen hohler, in den Boden *TUVW* mündender Fuß *F* mit der Windlade eines Blasebalges in Verbindung steht. In den Kasten *PRUW* wird von oben her ein zweiter hölzerner Kasten hineingesetzt, dessen vordere und hintere Wand unten keilförmig zusammenlaufen, während die beiden Seitenwände, ein Paralleltrapez bildend, vertikal gerichtet sind. Der Deckel *abcd* hat eine kreisrunde Öffnung, in die ein Schallbecher gesteckt werden kann. Unten bei *efgh* wird der innere Kasten durch ein mit einem Schlitz durchsetztes Querbrettchen abgeschlossen, an welchem nach abwärts die Zungenplatte aufgeschraubt ist. Der durch *F* eindringende Wind muß, um zur

Deckelöffnung gelangen zu können, die Zunge passieren und sie in Bewegung setzen. Die Teiltöne des so entstehenden Klanges kann man einzeln sehr gut zu Gehör bringen, indem man einen ungefähr auf den betreffenden Ton abgestimmten Resonator mit der Mündung dicht an das Loch im Deckel *abcd* hält und dabei seine hintere kleine Öffnung abwechselnd mit dem Finger schließt und wieder frei gibt. Der Resonator wird hierdurch umschichtig höher und tiefer gestimmt und läßt somit den Teilton, je nachdem er entweder das eine oder das andere Mal besser mit ihm übereinstimmt, intermittierend hervortreten. Man benutzt zweckmäßigerweise zu solchen Versuchen nicht zu hoch gestimmte Zungen, sondern etwa eine von 50 oder

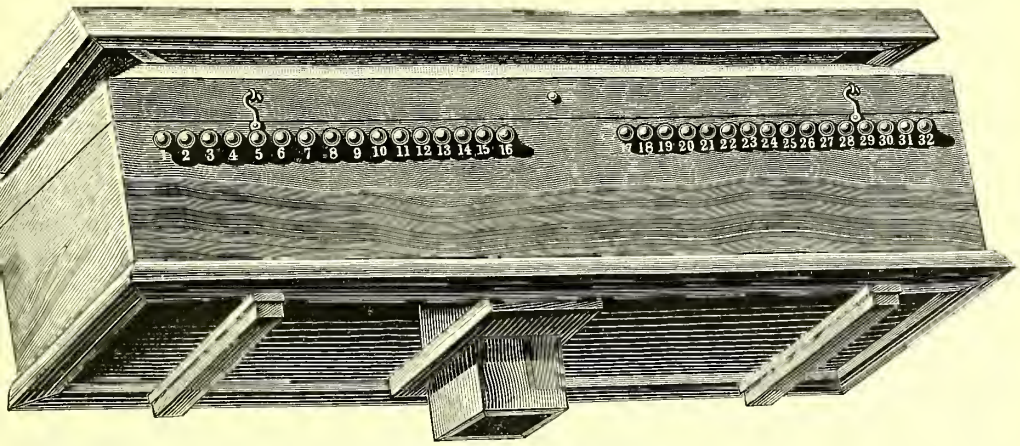


Fig. 37.
Kasten gebrauchsfertig aufgeblasen.

100 Schwingungen, damit auch die höheren Obertöne noch innerhalb des Bereiches der Verstärkbarkeit durch Resonatoren liegen.

Ihre hauptsächlichste Verwendung finden die durchschlagenden Zungen bei physiologisch- und psychologisch-akustischen Untersuchungen in der einen oder anderen Form der von G. Appunn erfundenen, einem kleinen Harmonium ähnlich gebauten Zungenkasten. Das älteste derartige Instrument ist wohl der Appunnsche Obertöne-Apparat, welchen die aus dem bekannten Buche „Sprache und Ohr“ von Oskar Wolf[1]) entnommenen Figuren 37 und 38 zeigen. Der hohle Fuß des Kastens wird auf die Windlade eines Blasebalges gesetzt. Die Preßluft strömt durch die obere Öffnung *a* des Fußes von unten her gegen den Deckel, der — einem Blasebalg von kleinen Dimensionen gleichend und als „Windregulator“ dienend — sich soweit hebt, bis der Faden *c* straff angezogen wird und durch Vermittelung des Hebels *d* das Ventil *b* gegen die Öffnung *a* drückt, so daß es die Windzufuhr absperrt. Bei diesem Zustande des Kastens lastet die Druckluft von oben her auf sämtlichen Zungen, und sobald einer der mit den Zahlen 1 bis 32 versehenen Schieber herausgezogen wird, fängt die zu ihm gehörige Zunge zu schwingen und zu tönen an, weil dann der Wind

1) Braunschweig 1871.

an der Zunge vorbei durch eine vom Schieber befreite Öffnung nach unten abströmen kann. Mit Hilfe der Schieber kann man sowohl jeden einzelnen Ton momentan zum Erklingen oder wieder zum Schweigen bringen als auch irgendwelche Kombinationen gleichzeitiger Töne erzeugen.

Bei dem hier abgebildeten Obertöne-Apparat entspricht die zum Schieber 1 gehörige Zunge dem Kontra-C (C_1) mit 32 Schwingungen; die Zunge 2 macht 2×32, die folgende Zunge 3×32 Schwingungen usf., so daß der Ton 32 das c^3 ist. Es versteht sich von selbst, daß man die Anzahl der Zungen und ihre Tonhöhenverhältnisse beliebig variieren und also Zungenkasten für die verschiedensten speziellen Zwecke anfertigen kann. So hat Appunn

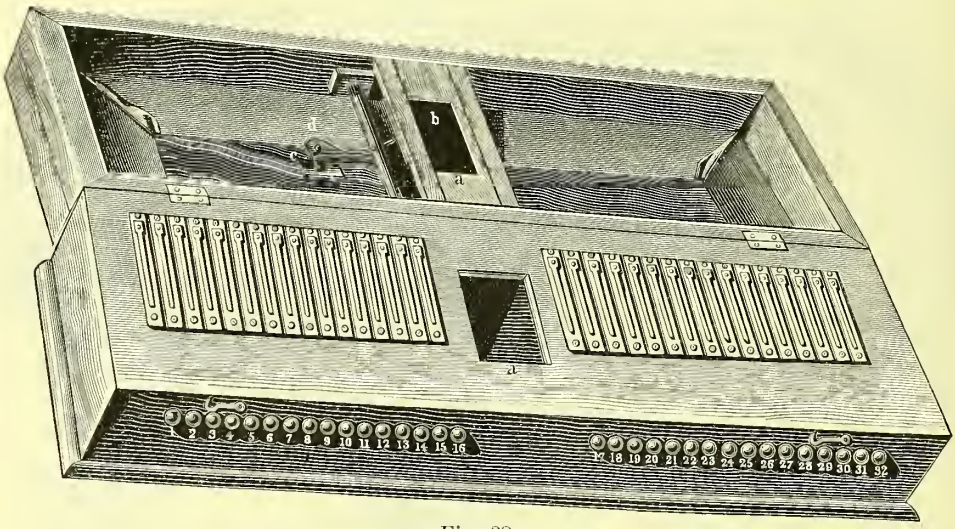


Fig. 38.
Kasten zur Demonstration des Inneren geöffnet.

selbst noch Obertöne-Apparate mit anderem Grundtone und mit mehr Obertönen sowie Tonmesser (Sonometer) für die Töne von c^0 bis c^2 gebaut. Preyer ließ sich von ihm zu Beobachtungen über die untere Hörgrenze einen „Grundtöne-Apparat“ herstellen, der aufrecht stehende, durch eine Glaswand sichtbare Zungen mit den Schwingungszahlen 8, 9, 10, 11, 12 usw. bis 40 enthielt, und für seine Untersuchungen über die Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit einen „Tondifferenz-Apparat“ mit den Schwingungszahlen 500; 500,1; 500,2, 500,3; 500,4; 500,5; 500,6; 500,7; 500,8; 500,9 501; 504; 508; 512; 1000; 1000,2; 1000,4; 1000,6; 1000,8; 1001; 1008; 1016 1024; 2048; 4096. Für Stumpf[1]) konstruierte der Sohn Georg Appunns erstens einen „Dreiklang-Apparat“ mit den Tonhöhen a) 100, 120, 125, 150; b) 200, 240, 250, 300; c) 400, 480, 500, 600; d) 800, 960, 1000, 1200; e) 80, 160, 640, 720; f) 700, 900, 1100; der die Herstellung mannigfaltiger Intervalle und ihr Studium in bezug auf Konsonanz und Dissonanz, auf

1) Näheres bei C. Stumpf, Bemerkungen über zwei akustische Apparate; Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane, Bd. 6, S. 33ff.

Wohlklang, auf Klangunterschiede von Dur und Moll, auf Schwebungen und Kombinationstöne erlaubt, und zweitens einen „Intervall-Apparat“ von 27 Zungen, dessen Hauptbestandteil die diatonischen Dur- und Mollintervalle innerhalb der (musikalisch am meisten gebrauchten) Oktave von 400 bis 800 Schwingungen bilden, und zwar in solchen Abstimmungen, daß daran alles Wesentliche der Lehre von den Intervallen zur Darstellung gebracht werden kann.

Nach dem Erlöschen der Firma Appunn in Hanau bezieht man die eben genannten Zungenapparate aus der Präzisionsmechanischen Anstalt von Max Kohl in Chemnitz. Was speziell die für so viele Untersuchungen überaus wichtigen Sonometer anbetrifft, mit deren Hilfe man in wenigen Augenblicken die Tonhöhe einer Pfeife, einer Gabel oder sonst einer Tonquelle durch Vergleichung mit einem Zungenton von exakt bestimmter Höhe feststellen kann, so sind im Katalog von Kohl fünf Tonmesser im Einzelpreise von 180 bis 450 Mk. aufgeführt. Der Tonmesser Nr. 1 umfaßt 33 Töne von c^0 bis c^1 (128 bis 256 Doppelschwingungen), wobei jeder Ton um 4 Doppelschwingungen höher ist als der vorhergehende; Tonmesser Nr. 2: 65 Töne von c^0 bis c^1 mit je 2 Schwingungen Differenz; Tonmesser Nr. 3: 65 Töne von c^1 bis c^2 (512 D.-Schw.) mit je 4 Schwingungen Unterschied; Tonmesser Nr. 4: 129 Töne von c^1 bis c^2 mit je 2 Schwingungen Höhendistanz; Tonmesser Nr. 5: 129 Töne von c^2 bis c^3 (1024 D.-Schw.) mit je 4 Schwingungen Intervall.

Sehr kompendiös und zu mannigfachen akustischen Zwecken dienlich ist die in Fig. 39 (aus dem Kohlschen Katalog) abgebildete „Akustische Zusammenstellung nach Prof. Ebbinghaus“, bestehend aus einem Whippleschen Doppelgebläse, einer Windlade mit Tisch, einem Intervallapparat und Tonmesser von Ebbinghaus, vier Sternschen Tonvariatoren, deren jeder noch extra mit einem Manometer versehen ist, und einer Zungenpfeife mit Schalltrichter, die in sehr großer Stärke den Ton C (= 64 D.-Schw.) gibt.

Die Metallzungen und damit also auch die Zungenkasten, haben vor anderen Tonerzeugungsmitteln den wesentlichen, besonders für die Tonmesser bedeutungsvollen Vorzug, verhältnismäßig unverstimmbar zu sein. Sie sind vor allem in ziemlich weitgehendem Maße von der Temperatur unabhängig. Weniger gilt dies von Differenzen des Anblasedruckes. Gleichwie eine Saite oder eine Stimmgabel etwas tiefer wird, wenn man die Kraft des Anschlages erhöht, so vertieft sich auch der Zungenton mit wachsendem Winddruck. Aber gerade bei den Zungenkasten ist ja durch die vorhin beschriebene Einrichtung des „Windregulators“ dafür gesorgt, daß der Druck eine gewisse Maximalgröße nicht überschreiten kann; wenn man überdies den Kastendeckel immer in gleicher Höhe aufgepumpt erhält und den oder die zur Verwendung kommenden Schieber stets vollständig herauszieht, so darf man die Tonhöhe in bezug auf den Druck als konstant ansehen. Man achte aber auch darauf, daß die Tonmessungen stets möglichst bei derselben Temperatur stattfinden, für welche die Zungen eingestimmt sind. Befolgt man diese Regeln und schützt man die Apparate dauernd vor Feuchtigkeit, Staub und starkem Temperaturwechsel, so bleiben die Schwingungszahlen der Zungen, wie Preyer gelegentlich ausdrücklich be-

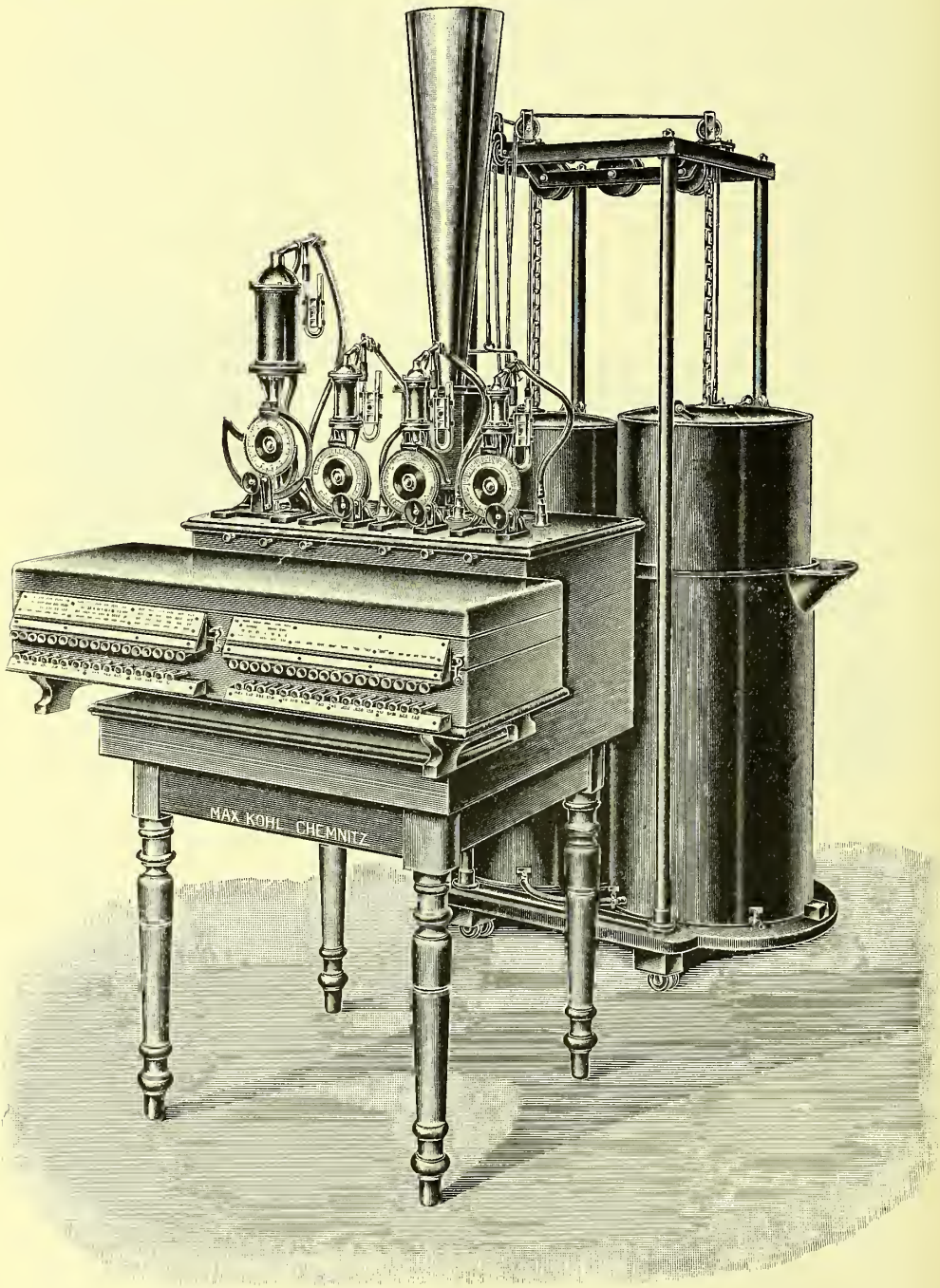


Fig. 39.

tont hat, über Monate und Jahre bis auf Zehntel genau. Immerhin ist es ratsam, die Stimmung von Zeit zu Zeit zu revidieren, was in der Weise geschieht, daß man unter Auszählung der Schwebungen zunächst eine geeichte Stimmgabel mit einigen Zungen von benachbarter Tonhöhe und dann die derart kontrollierten Zungen wieder sukzessive mit den übrigen vergleicht[1]). Sollte eine Verstimmung eingetreten sein, so läßt sich durch Schaben am freien Ende der Zunge der Ton erhöhen; feilt man in der Nähe des festen Endes, so wird der Ton tiefer. Auch durch Auflöten von Metall auf die Zungenspitze kann man übrigens die Schwingungszahl und zwar nach Belieben erheblich verringern. Durch dieses Mittel gelang es auch Appunn, mit relativ sehr kurzen Zungen Tonhöhen zu erzielen, die in der Subkontra-Oktave und darunter lagen.

Sehr wichtig ist es zu wissen, daß zwei gleichzeitig erklingende Zungen eines Zungenkastens sich unter Umständen gegenseitig beeinflussen können. Über diesen, der weiteren Untersuchung noch bedürftigen Gegenstand teilt

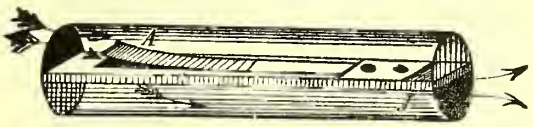


Fig. 40.

C. Stumpf in der oben zitierten Beschreibung seines Dreiklang- und Intervall-Apparates das Folgende mit: „Die Zunge 800 gab niemals mit 800,1, auch nicht mit 800,2 und 800,4 irgendwelche Schwebungen. Ferner schwebte 801 mit keiner der vier nächsttieferen Zungen (nämlich 800,8; 800,6; 800,4; 800,2). Daß die Zungen nicht wirklich gleiche Höhe hatten, ließ sich an der Verschiedenheit der Schwebungen mit etwas entfernteren Zungen, vielfach auch durch das Ohr bei sukzessivem Erklingen erkennen. Es fand also eine Akkommodation (erzwungene Schwingung) statt. Die Erscheinung ist natürlich eine objektive, physikalische.“ Des weiteren macht Stumpf a. a. O. auf die gegenseitige Schwächung der Grundtöne aufmerksam. Er hatte dieselbe bereits früher an den Zungen 500 und 500,1 des Preyerschen Tondifferenz-Apparates bemerkt, und auf seine Bitte um eine Nachprüfung schrieb ihm Herr Professor Biedermann-Jena: „Ihre Beobachtung ist vollkommen richtig gewesen. Ich habe den Versuch nachgemacht, und es zeigt sich in der Tat, daß beim Anblasen von 500 und 500,1 der Grundton vernichtet wird und der erste Oberton rein hervortritt. Je größer das Intervall wird (500,2; 500,3 usw.), desto deutlicher macht sich daneben wieder der Grundton geltend. Dieselbe Erscheinung tritt übrigens auch bei höheren Schwingungszahlen (1000—1000,1) auf. Schwebungen konnte ich erst bei größeren Intervallen (500—500,7) hören.“

Ist man nicht im Besitze eines Appunnschen Tonmessers, so kann man als freilich etwas dürftigen Ersatz eine Serie der einfachen im Handel befindlichen Stimmpfeifen benutzen. Wie Fig. 40 veranschaulicht, besteht eine solche — meist werden sie für den Kammerton (a^1) angefertigt — aus

1) Näheres über diese Methode im Kapitel „Schwingungszahlenbestimmung“.

einer Zunge, die mit ihrem Rahmen in einem Metallrohr von gleicher Länge befestigt ist; rechts ist die obere, links die untere Hälfte der Röhrenmündung geschlossen, so daß der bei A eintretende Anblasewind gezwungen wird, auf dem durch die Pfeile angegebenen Wege nach J hin abzuströmen. Um die Zunge zum Tönen zu bringen, muß man das Zungenmundstück, wie man den kleinen Apparat auch wohl nennt, entweder mit dem linken Ende an die Lippen setzen und blasen oder mit dem rechten Ende und dann saugen, da die Zunge nur ins Schwingen gerät, wenn der Luftstrom die Richtung der Pfeile hat. Eine Stimmpfeife dieser Art kann man sich nötigenfalls aus einer der leicht käuflichen Zungen, wie sie für Mund- und Ziehharmonikas gebraucht werden, einem Stück dickwandigen Gummischlauches

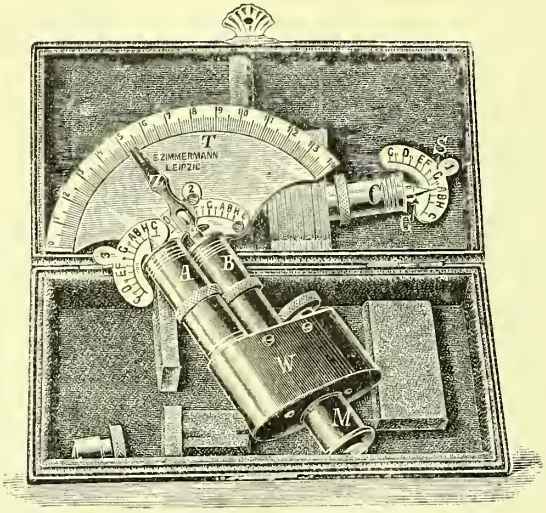


Fig. 41.

von passender Länge und Lichtung sowie etwas Wachskitt zum Abdichten selbst herstellen.

Richtet man die Stimmpfeife mittelst einer den „Stimmkrücken“ der Orgelpfeifen ähnlichen Vorrichtung so ein, daß die Tonhöhe der Zunge sich verändern läßt, so entsteht eine kontinuierliche Stimmpfeife. Man hat dieselben in verschiedenen Konstruktionen. Besonders empfehlenswert ist das „Reisetonometer nach Dr. E. v. Hornbostel“ (Fig. 41), welches vom Präzisionsmechaniker E. Zimmermann-Leipzig zu beziehen ist. Dieses Tonometer besteht aus den drei kontinuierlichen Stimmpfeifen A, B, C und einem Windkästchen W, das hinter dem Mundstück M eine Vorlage zum Abfangen des Wasserdampfes der Atemluft enthält. Es können nach Belieben eine, zwei oder drei Stimmpfeifen zugleich verwendet werden. Jede Zunge läßt sich durch einen über sie hingleitenden Metallstab verkürzen bzw. verlängern. Der Gleitstab G dient zugleich als Zeiger, welcher die eingestellte Tonhöhe an einer Skala abzulesen gestattet. An einer der drei Stimmpfeifen ist eine Verlängerung des Zeigers Z und eine feinere Gradteilung angebracht. Diese Pfeife dient als Tonmesser. Die Skala T ent-

hält 140 Teilstriche und muß, da die Teilung empirisch ist, geeicht werden (mit Hilfe von Stimmgabeln oder eines Appunnschen Tonmessers). Einem Skalengrade entspricht in der tiefsten Region eine Differenz von 1,5, in der höchsten eine solche von 3 Schwingungen; der Umfang der Pfeife reicht ungefähr von 350 bis 700 Schwingungen. Hieraus ergibt sich eine Differenz von $^1/_{13}$ des temperierten Halbtones für einen Skalengrad, und da halbe Grade noch bequem und sicher abgelesen werden können, eine Messungsgenauigkeit von etwa $^1/_{26}$ des temperierten Halbtones. Wegen seiner Kleinheit und seines geringen Gewichtes eignet sich der Apparat namentlich zu wissenschaftlichen Beobachtungen auf Reisen. Tonhöhenbestimmungen ausländischer Musikinstrumente, Versuche an Naturvölkern über die ästhetische Wirkung von Akkorden, über Konsonanzbewußtsein, über Intervallurteil und ähnliche Aufgaben lassen sich damit lösen.

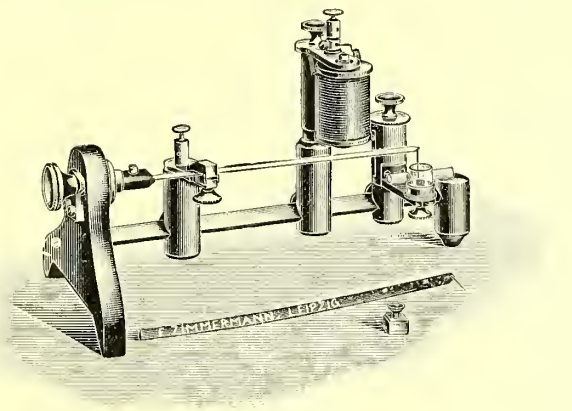


Fig. 42.

Eine Abart der Zungen bilden die Lamellen, welche nicht durch Preßluft zum Schwingen gebracht werden.

Anton Appunn[1]) hat zwecks Beobachtung tiefster Töne eine Metalllamelle von 1 mm Dicke, 12 mm Breite und 420 mm Länge konstruiert, an deren oberem Ende eine dünne runde Metallscheibe von 40 mm Durchmesser zur Verstärkung der Lufterschütterungen angebracht ist. Das einfache Instrument wird in vertikaler Stellung in einen Schraubstock eingespannt und dann mit der Hand in Pendelschwingungen versetzt. Je nach der Länge des oben aus dem Schraubstock herausragenden Endes kann die Schwingungszahl zwischen 4 und 24 variiert werden. Die zu jeder Schwingungszahl gehörige Länge ist durch einen Strich auf der Lamelle markiert, diese also mit einer Tonhöhenskala versehen. Durch einen 50 mm langen Tuchring, der ungefähr in $^1/_3$ der jeweiligen Länge verschoben werden kann, sollen die Obertöne gedämpft werden. Indessen hat van Schaik[2]) nachgewiesen, daß derartige Lamellen außer dem Grundtone auch dessen Oktave sowie zuweilen

1) Akustische Versuche über die Wahrnehmung tiefer Töne usw. Akustisches Institut in Hanau 1889.

2) Wellenlehre und Schall; Braunschweig 1902, S. 164.

noch die Duodezime hören lassen, also vor den tiefen Laufgewichtgabeln keinen wesentlichen akustischen Vorzug haben.

Eine andere Anwendungsform der Lamelle repräsentiert der Bernsteinsche akustische Unterbrecher, für den auch die Bezeichnung schwingende Feder gebraucht wird. Dieser Apparat, eine Modifikation des bekannten Neefschen Hammers, ist zuerst als Stromunterbrecher in J. Bernsteins „Untersuchungen über den Erregungsvorgang im Muskel- und Nervensystem“ [1]) beschrieben. Er ist in derselben Weise zu benutzen und zu behandeln wie die elektrisch betriebenen Stimmgabeln. Die Möglichkeit, die Tonhöhe durch Verlängerung oder Verkürzung des schwingenden Lamellenendes bzw. durch Auswechselung verschieden dicker Federn innerhalb eines Bereiches von etwa 5 bis 400 Schwingungen rasch und beliebig ändern zu können, macht den Unterbrecher trotz des Preises von ca. 100 Mk. zu einem wertvollen Bestandteil des akustischen Instrumentariums. Bei der älteren Bauart ist die schwingende Feder nebst Zubehör in einem vertikalen viereckigen schweren Metallrahmen befestigt. Ich habe denselben bei manchen Versuchsanordnungen störend gefunden — so verhindert er z. B. das Heranführen eines Resonators an die Feder von oben her — und bevorzuge daher die in Fig. 42 abgebildete Zimmermannsche Konstruktion.

f) Sirenen.

Läßt man an dem gezähnten Rande eines rotierenden Rades ein Kartenblatt oder ein dünnes Holzbrettchen schleifen, so entsteht ein Ton. Versuche dieser Art sind bereits 1681 von Robert Hooke angestellt, doch gilt Savart als der eigentliche Erfinder der Zahnradsirene. Sein Apparat ist in Figur 43 dargestellt. Die Tonhöhe hängt von der Anzahl der in der Sekunde das Kartenblatt passierenden Zähne ab, steigt und sinkt also mit der Rotationsgeschwindigkeit. Die Tonbildung beruht auf den Hin- und Hergängen des abwechselnd von einem Zahn gehobenen und wieder zurückfedernden Blattes. Da diese Bewegung eine keineswegs rein pendelförmige ist, so resultiert ein mehr oder weniger komplizierter Klang, dem sich überdies das von dem Anschlagen der Zähne an das Blatt erzeugte Geräusch beimischt. Statt eines einzigen Rades kann man auch deren mehrere auf eine und dieselbe Achse setzen und gleichzeitig zum Ertönen bringen. Stehen dabei die Zähne der einzelnen Räder hinsichtlich ihrer Zahl in passendem Verhältnis, so bekommt man einen musikalischen Akkord. Beispielsweise ergeben drei Räder, von denen das erste 400, das zweite 500, das dritte 600 Zähne hat, den Durdreiklang und zwar in höherer oder tieferer Lage, je nachdem rascher oder langsamer gedreht wird.

Beliebter im Gebrauch als die Zahnräder sind die Löcherscheiben-Sirenen. Ihre einfachste Form ist die von Seebeck angegebene. Auf einer kreisrunden Scheibe aus Metall, Holz, Pappe oder Papier wird eine Anzahl gleichgroßer und gleichweit von einander abstehender Löcher so ausgestanzt, daß dieselben einen Kreis bilden, dessen Mittelpunkt das Zentrum der Scheibe ist. Letztere befestigt man alsdann gut zentriert auf einer Achse

1) Heidelberg 1871; S. 98, Tafel III u. IV.

und versetzt sie in Drehung, während zugleich der Löcherkreis durch eine senkrecht gegen ihn gerichtete Röhre angeblasen wird. Sobald ein Loch an der Mündung der Röhre vorüberkommt, dringt der Luftstrom aus dieser

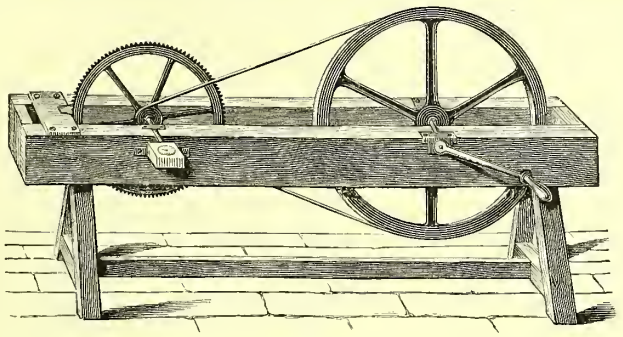


Fig. 43.

durch die Scheibe hindurch; zur Zeit der Pause zwischen je zwei Löchern wird er abgesperrt. Daß auf solche Weise der an sich kontinuierliche Luftstrom durch die rotierende Scheibe in einzelne Luftstöße von periodischer

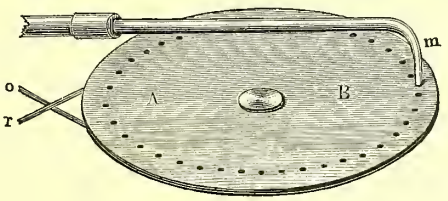


Fig. 44.

Aufeinanderfolge aufgelöst wird, ist die Ursache der Ton- oder richtiger Klangbildung: es entsteht ein Grundton (dessen Schwingungszahl gleich der Anzahl der pro Sekunde angeblasenen Löcher ist) nebst diversen Obertönen.

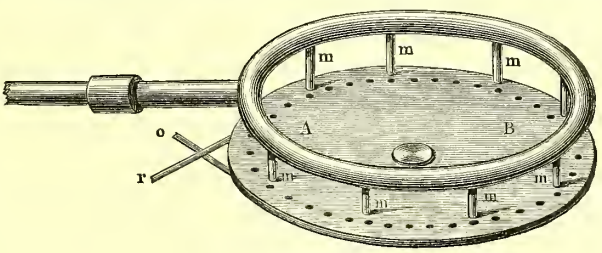


Fig. 45.

Das Anblasen kann mit dem Munde geschehen oder mittelst eines Blasebalges. Ganz besonders empfehlenswert sind aber auch hier wieder die Preßluftflaschen und die Kompressionsapparate, welche Wind von konstantem und nach Bedarf abstufbarem Druck liefern. Für gewöhnlich bläst man, wie eben beschrieben, nur durch eine Röhre. (Vgl. Fig. 44, worin AB die

Scheibe, *or* den Schnurlauf und *m* die Anblaseröhre bedeutet.) Indessen kann man natürlich auch, etwa in der Form der Fig. 45, für mehrere oder gar für alle Löcher zugleich je eine Ausflußöffnung des Luftstromes anbringen, wodurch die Klangintensität entsprechend gesteigert wird.

Gleichwie durch eine Kombination von Zahnradsirenen läßt sich auch durch eine Vereinigung verschiedener Löcherkreise auf einer und derselben Scheibe eine Akkordsirene herstellen. Die erste Ausführung dieses Gedankens stammt von Opelt, dessen mehrstimmige Sirene sogar noch einige Jahre älter ist als die einfachere Seebecksche. Fig. 46 gibt ein leichtverständliches Bild davon. *A* ist ein für sämtliche Löcherreihen gemeinsames Luftreservoir, aus dem der Wind vermittelst besonderer Hähne (s. die Teilabbildung oben rechts) zu den einzelnen Kreisen zugelassen werden kann.

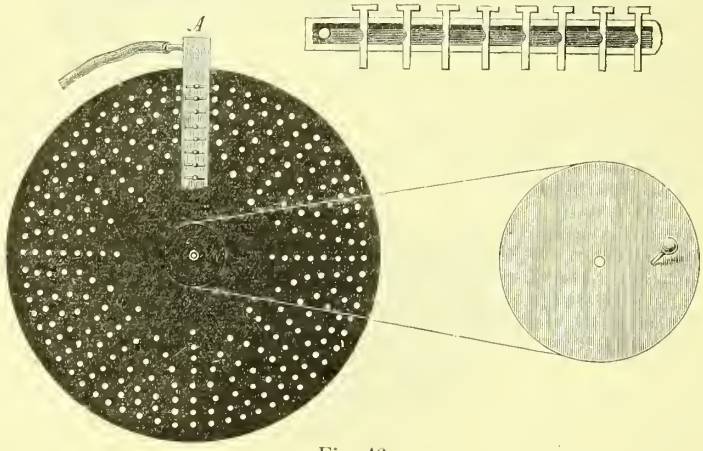


Fig. 46.

Ist der Durchmesser der Löcher einer Seebeckschen Scheibe oder der Abstand derselben voneinander nicht durchweg gleichartig sondern periodisch wechselnd, so entstehen außer dem Hauptklang gewisse Nebentöne und bei völliger Regellosigkeit lediglich Geräusche. Auf diese akustisch sehr interessanten Erscheinungen soll jedoch hier nicht näher eingegangen werden. Dagegen sei hervorgehoben, daß die Öffnungen der gewöhnlichen Seebeckschen Sirene nicht notwendig kreisförmig zu sein brauchen. Man kann ihnen auch die Gestalt von rechteckigen, radiär gestellten Schlitzen, von Dreiecken oder von Rhomben geben. Die Höhe des Grundtones wird von der Form der Löcher nicht beeinflußt, wohl aber die Klangfarbe, d. h. die Zahl und Stärke der den Grundton begleitenden Obertöne. Je plötzlicher der durch die Öffnungen dringende Luftstrom einsetzt und aufhört, um so schärfer muß der Klang werden. Auch die Größe und Gestalt der Anblaserohrmündung ist in dieser Beziehung nicht gleichgültig.

Die im Jahre 1819 von Baron Cagniard de La Tour[1]) beschriebene Sirene beruht auf dem Prinzip, daß eine Löcherscheibe mit einem Wind-

1) Annales de Chimie et de Physique, Tome XII, P. 167.

raum in Verbindung steht, aus dem sie mit der nötigen Anblaseluft versorgt wird, daß der Luftstrom nicht bloß durch ein, sondern durch alle Löcher zugleich hindurchdringt, und daß der Winddruck außer der Tonerzeugung auch noch die Rotation der Scheibe besorgt, ein besonderer Antriebsmechanismus also fortfällt. Der Bau des Instrumentes wird aus den Abbildungen 47 bis 49 (Konstruktion von Stöhrer) klar. *AA* ist der durch das Rohr *BB* mit einem Blasebalge kommunizierende Windkessel. Unmittelbar über dem-

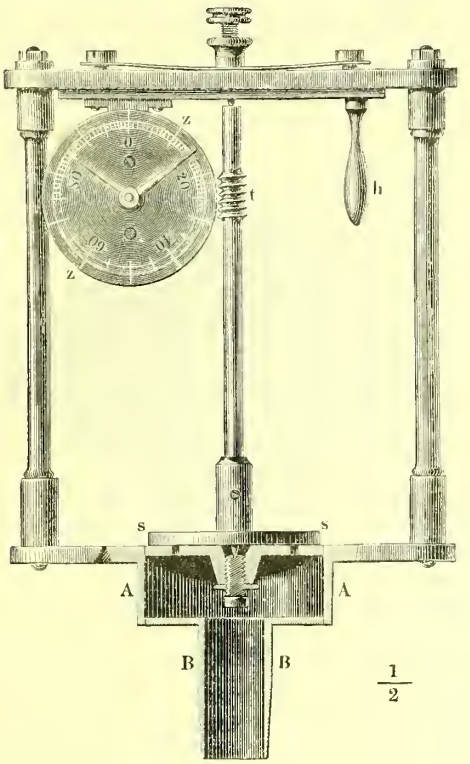


Fig. 47.

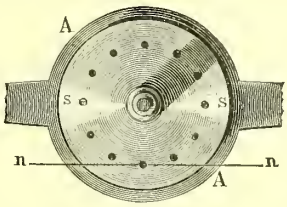


Fig. 48.

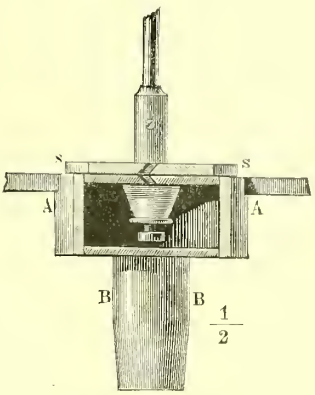


Fig. 49.

selben befindet sich die, in Fig. 48 von oben gesehene, Löcherscheibe *ss*, deren Achse, wie Fig. 47 zeigt, äußerst leicht drehbar auf Spitzen zwischen zwei Schrauben läuft. Scheibe und Windkastendeckel haben gleich viele, gleich große und äquidistante Löcher, so daß, wenn ein Loch der Scheibe gerade über einem solchen des Deckels steht, auch alle anderen korrespondierenden Löcher sich decken. Dabei sind die Öffnungen, und zwar nach entgegengesetzten Richtungen, schräg durch die Platten gebohrt. (Vgl. Fig. 49, welche einen senkrechten Durchschnitt durch *AA* und *ss* entsprechend der Linie *nn* in Fig. 48 darbietet.) Diese Stellung bewirkt, daß der austretende Wind die Scheibe vor sich her schiebt und somit in Rotation versetzt. In Fig. 47 sieht man noch das Zählwerk *zz*, auf dessen Funktion wir im Kapitel

Schwingungszahlenbestimmung zurückkommen werden[1]). — Statt Luft kann man mit gleichem Erfolge Wasser in den Kessel und durch die Scheibenlöcher treiben. Der Apparat „singt" also auch im Wasser und ist gerade deswegen in Erinnerung an die gleichnamigen Gestalten der griechischen Mythologie Sirene genannt worden. Bei den Sirenen, die auf Schiffen zum Signalgeben benutzt werden, übernimmt der Dampf die Rolle des Tonerregers.

Die Sirene von Cagniard de La Tour gibt, da sie nur einen Löcherkreis besitzt, auch nur einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Zahl

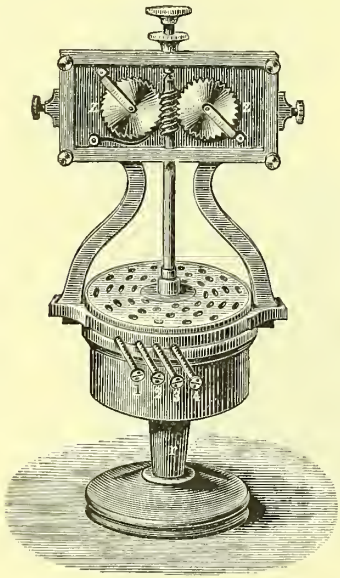


Fig. 50.

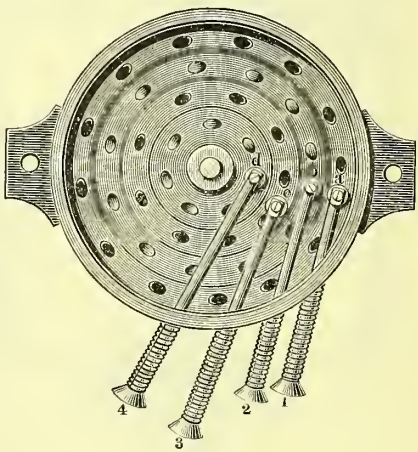


Fig. 51.

der Löcher auf der Scheibe *ss* multipliziert mit der Zahl der Umdrehungen pro Sekunde ist. Dove[2]) versah die rotierende Scheibe und ebenso auch den darunterliegenden festen Deckel des Kastens mit vier konzentrischen Löcherreihen und vervollkommnete so die ältere einfachere Form zu einer mehrstimmigen Sirene (Fig. 50). Außerdem traf er noch eine besondere Einrichtung, um nach Belieben nur einen oder einige der Kreise zur Zeit in irgendeiner Kombination zum Tönen bringen zu können. Zu diesem Zwecke dienen die in den Figuren 50 und 51 sichtbaren Stifte 1, 2, 3 und 4. Fig. 51 stellt eine aus durchlöcherten, aneinander verschieblichen, konzentrischen Ringen zusammengesetzte Platte dar, die im Innern des Windkastens, direkt unter dessen Deckel, angebracht ist. Durch Druck auf einen der Stifte wird der zugehörige Ring so gedreht, daß seine Durchbohrungen genau unter die entsprechenden Löcher des Windkastendeckels und der Sirenenscheibe zu

1) S. Seite 300.
2) Poggendorffs Annalen der Physik u. Chemie, Bd. 82, 1851.

liegen kommen, worauf der Wind auszuströmen und die Scheibe zu rotieren beginnt. Solange kein Druck auf die Stifte ausgeübt wird, werden diese von den außen an ihnen befindlichen Spiralfedern so festgestellt, daß die Ringe die Öffnungen des Kessels verschlossen halten und somit das Erklingen der betreffenden Löcherkreise verhindern.

Eine weitere Entwicklungsstufe der hier in Rede stehenden Sirenenform stellt die ältere Helmholtzsche Doppelsirene dar. Sie ist eine Kombination zweier Dovescher Sirenen, die einander die Deckplatten zukehren und deren Rotationsscheiben eine gemeinsame, in der Mitte mit einem Zählwerk verbundene Achse haben (Fig. 52). Die Einrichtung im Einzelnen beschreibt Helmholtz in seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ [1]) an der Hand zweier in Fig. 53 und 54 wiedergegebener Abbildungen folgendermaßen. Es sind a_0 und a_1 die beiden Windkästen, c_0 und c_1 die Scheiben, k die Schraube für den Zählapparat, g_0 und g_1 die Windzuführungsrohre. Der obere Kasten a_1 kann um seine Achse gedreht werden. Zu dem Ende ist er mit einem Zahnrade versehen, in welches das kleinere mit der Kurbel d verbundene Zahnrad e eingreift. Die Achse des Kastens a_1, um die er sich dreht, ist eine Verlängerung des oberen Windrohres g_1. Dieselbe wird, wie Fig. 54, wo sie mit E bezeichnet ist, erkennen läßt, von dem oberen Querbalken des Gestelles AA fest umschlossen. Das in den Kasten B hineinragende Stück hat am oberen und unteren Ende kegelförmige Flächen, auf denen entsprechende Aushöhlungen im Boden und Deckel des Kastens gleiten, so daß letzterer sich frei um das Windrohr als Achse drehen kann. Bei α sieht man den Querschnitt des Zahnrades, welches am Boden des Kastens festsitzt, bei β das Getriebe, welches mittelst der Kurbel γ gedreht wird; δ ist der Zeiger, der nach der Teilung am Rande der Scheibe $\varepsilon\varepsilon$ hin gerichtet ist. D ist das obere Ende von der Achse der beweglichen Scheiben, von denen man die obere CC (gleich c_1 in Fig. 53) hier sieht. Die Achse läuft auf feinen Spitzen in kegelförmigen Pfannen. Die obere der letzteren befindet sich im unteren Ende der Schraube η, welche durch einen von oben her eingeführten Schraubenzieher mehr oder weniger angezogen werden kann, so daß man den wünschenswerten Grad von Leichtigkeit und Sicherheit bei der Bewegung der Achse erreicht. Im Innern des Kastens sieht man die Querschnitte von vier durchlöcherten Ringen, $\varkappa\lambda$, $\lambda\mu$, $\mu\nu$ und νo, welche mit schräg geschnittenen Rändern wie Dachziegel oder wie die Ringe von Herdplatten übereinander greifen und sich so gegenseitig festhalten. Jeder dieser Ringe liegt unter einer der Löcherreihen des Deckels und enthält genau ebenso viele Löcher wie die entsprechende Reihe des Deckels und

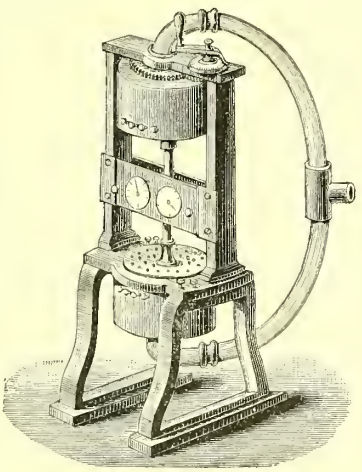


Fig. 52.

1) 5. Ausgabe, S. 269 ff. und Beilage XIII, 1896.

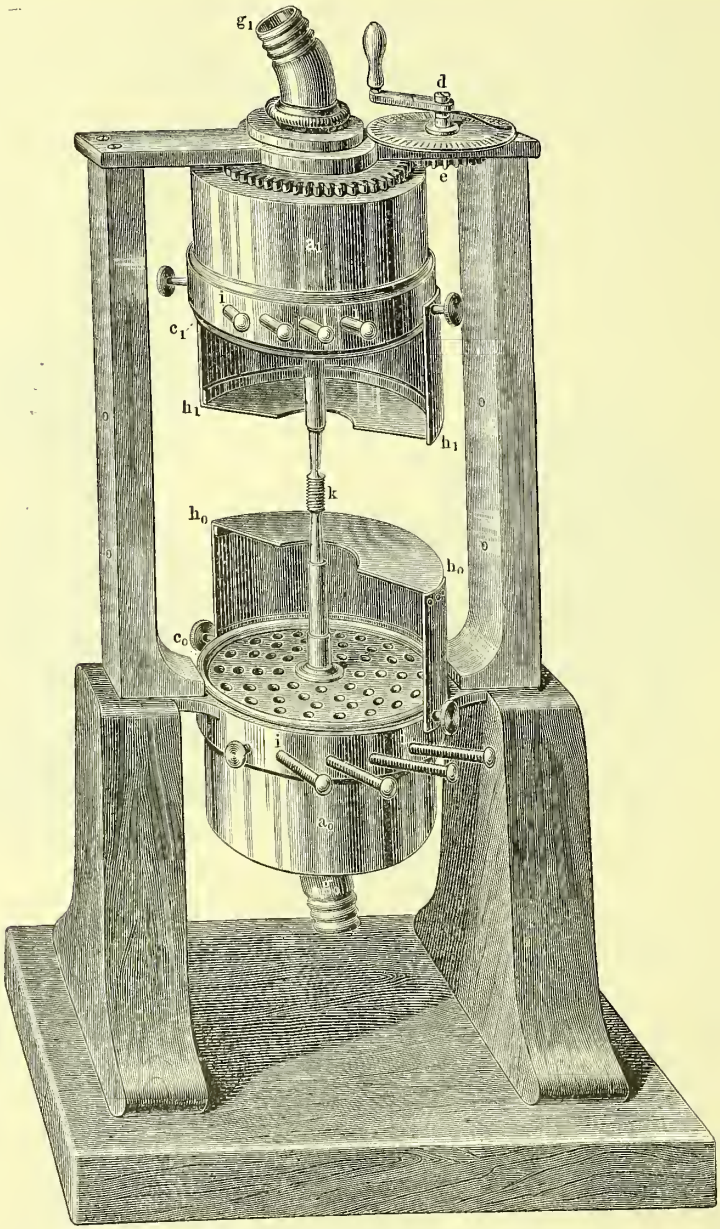


Fig. 53.

der rotierenden Scheibe. Mittelst der Stiftchen *ii* (s. Fig. 53) werden wie bei der Doveschen Sirene die vier genannten Ringe etwas verschoben, so daß entweder die Löcher des Ringes mit denen des Kastens zusammenfallen, die Luft freien Ausgang erhält und der entsprechende Ton zustande kommt,

oder aber der Ring sich so stellt, daß die Zwischenräume seiner Löcher die Öffnungen des Deckels schließen und der Ton ausbleibt. Die obere Sirenenscheibe (c_1 in Fig. 53) hat vier Löcherkreise mit bzw. 9, 12, 15 und 16 Löchern, die untere vier Reihen mit bzw. 8, 10, 12 und 18 Öffnungen. Nennt man also den Ton von 8 Löchern etwa c, so hat die untere Scheibe die Töne c, e, g, d^1 und die obere d, g, h, c^1. Es lassen sich demnach alle musikalischen Intervalle innerhalb der Oktave (zum Teil mehrfach) und außerdem noch die None hervorbringen. Da die Sirenen„töne" durchaus keine einfachen Töne, sondern Klänge sind, so ist es zwecks Dämpfung der harmonischen Obertöne durch ein Ansatzrohr nützlich, die Sirenen mit Messingkästen zu versehen, von denen man bei $h_0 h_0$ und $h_1 h_1$ in Fig. 53 die hintere

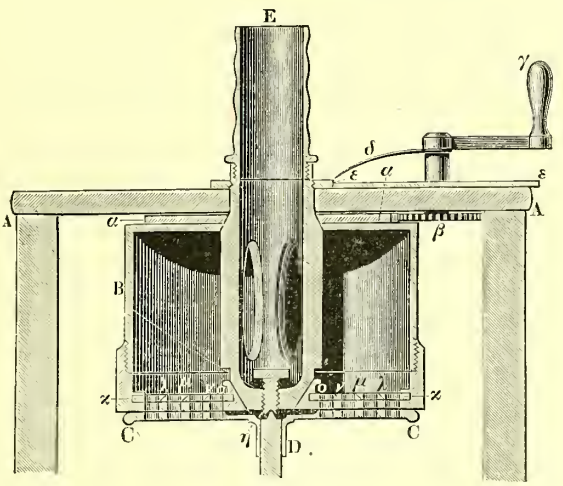


Fig. 54.

Hälfte sieht. Diese Kästen sind in je zwei Hälften zerschnitten, so daß man sie abnehmen und wieder aufsetzen kann, indem man sie durch Schrauben auf dem Windkasten befestigt. Wenn der Sirenenton sich dem Grundton dieser Kästen nähert, wird der Klang voll, stark und weich, wie ein schöner Hornton, während sonst die Sirene ziemlich scharf klingt; gleichzeitig braucht man wenig Luft, aber starken Druck. In dieser Form ist die Sirene namentlich zu Interferenzversuchen sehr geeignet.

Die Drehbarkeit des oberen Windkastens ermöglicht es, Versuche über Phasenverschiebungen und Schwebungen auszuführen. Um dies näher zu erläutern, sei von der Annahme ausgegangen, daß bei beiden Sirenen nur die 12-Löcherreihe benutzt werde, also Unisono bestehe, und daß anfänglich die Luftstöße auf beiden Seiten genau gleichzeitig erfolgen. Dann fallen die gleichen Phasen sowohl des Grundtones wie sämtlicher Obertöne zusammen und alle diese Töne werden verstärkt. Dreht man nun die Kurbel um einen halben rechten Winkel, was einer Drehung des Kastens um $^1/_6$ eines rechten Winkels oder um $^1/_{24}$ der Peripherie oder um den halben Abstand der Öffnungen in der angeblasenen Reihe (von 12 Löchern) entspricht, so

beträgt die Phasendifferenz der beiden Grundtöne $^1/_2$ Schwingungsdauer, die Luftstöße des einen Kastens fallen gerade in die Mitte zwischen die des anderen, und die beiden Grundtöne vernichten sich gegenseitig infolge dieser Interferenz mit entgegengesetzter Phase, wie man das auch bei anderen unisonen Klangquellen findet, die man mit dem Gangunterschied von einer halben Schwingung zusammenwirken läßt. Dahingegen beträgt die Phasendifferenz der beiden ersten Obertöne (Oktaven) eine ganze Schwingungsdauer; diese verstärken sich deswegen gegenseitig, und so verstärken sich auch alle geradzahligen harmonischen Teiltöne, während die ungeradzahligen sich aufheben. Bei der Phasendifferenz $^1/_2$ wird also der Einklang der beiden Sirenen schwächer, weil gewisse Partialtöne fortfallen; aber er hört nicht auf, sondern schlägt vielmehr in seine Oktave um. Dreht man die Kurbel um einen zweiten halben Rechten, so daß die ganze Drehung einen vollen Rechten beträgt, so fallen die Luftstöße beider Scheiben wieder genau zusammen, die Töne verstärken sich. Bei einer ganzen Umdrehung der Kurbel findet man also 4 Stellungen, wo der ganze Klang der Sirene verstärkt erscheint, und 4 andere dazwischen, wo der Grundton nebst allen ungeradzahligen harmonischen Teiltönen verschwindet und dafür schwächer die höhere Oktave mit den geradzahligen Teiltönen eintritt. Achtet man auf den ersten Oberton, die Oktave, allein, indem man ihn durch eine passende Resonanzröhre heraushebt, so findet sich, daß er nach Drehung um $^1/_4$ Rechten schwindet, nach Drehung um $^1/_2$ Rechten wieder verstärkt wird, also bei einer ganzen Umdrehung der Kurbel 8 mal schwindet und 8 mal hervorkommt. Der dritte Teilton, die Duodezime des Grundtones, schwindet in derselben Zeit 12 mal, der vierte Ton 16 mal usw.

Schwebungen erhält man, wenn man bei anfänglichem Unisono der beiden Sirenen den oberen Kasten mittelst der Kurbel nicht bloß, wie eben angenommen, von einer ruhenden Stellung in eine andere, sondern vielmehr in eine ununterbrochene Rotation versetzt. Drehen wir nämlich den Kasten in derselben Richtung herum, wie die Scheibe läuft, so wird der Ton tiefer, drehen wir der Scheibe entgegen, so wird er höher als der unveränderte Ton der anderen Scheibe und muß in beiden Fällen mit diesem schweben. Die Tonhöhenänderung erklärt sich einfach so: Die Schwingungsdauer des Sirenentones ist gleich der Zeit, welche ein Loch der rotierenden Scheibe braucht, um von einem Loche des Windkastens bis vor das nächste zu gelangen. Kommt das Loch des Kastens dem Loche der Scheibe entgegen durch eine Drehung des Kastens, so werden die beiden Löcher eher zusammenstoßen, als wenn der Kasten still steht; die Schwingungsdauer wird kürzer, der Ton höher. Das Umgekehrte findet bei der entgegengesetzten Drehung des Kastens statt. Man hört diese Erhöhungen und Vertiefungen des Tones sehr leicht, wenn man ein wenig schneller dreht. Da die Drehung der Kurbel um einen Rechten den Kasten gerade um den Abstand zweier Öffnungen der 12-Löcherreihe vorwärtsbringt, so gewinnt man also bei einer solchen Drehung, wenn sie der rotierenden oberen Scheibe entgegen gerichtet ist, gegenüber der unteren Scheibe 1 Loch und bei einer Umdrehung der Kurbel um 360° 4 Löcher; d. h. der Ton der 12-Löcherreihe der oberen Scheibe macht bei einer jeden Totalumdrehung der Kurbel 4 Schwingungen mehr als jener der unteren Sirene, es entstehen mit anderen

Worten 4 Schwebungen und in einer Sekunde 4 mal soviel Schwebungen, als die Kurbel Totalumdrehungen macht. Eine analoge Überlegung ergibt, daß die gleiche Anzahl Schwebungen auch bei der Drehung des Kastens im Sinne der Scheibe auftreten muß.

Wie die Figuren 43 und 46 andeuten, lassen sich die Zahnrad- und einfachen Scheibensirenen durch Drehung mit der Hand in Bewegung setzen. Aus eigener Erfahrung kann ich berichten, daß es dabei durch Übung möglich ist, eine für die meisten Untersuchungen genügende Konstanz der Geschwindigkeit zu erreichen, zumal wenn man von Zeit zu Zeit mit Hilfe des Ohres und einer Stimmgabel das Festhalten der Tonhöhe kontrolliert. Die Benutzung der Hand hat ferner noch den besonderen Vorzug, daß die Rotationsgeschwindigkeit ohne Umstände und beliebig geändert werden kann. Bedient man sich etwa eines Elektromotors oder eines Heißluftmotors als Triebkraft, so muß man mit Störungen durch das Geräusch und namentlich durch die Inkonstanz des Umlaufes der Maschine rechnen und überdies ein Stufenscheiben-Vorgelege zu Hilfe nehmen, wenn die Drehungsgeschwindigkeit und damit die Tonhöhe, wie viele Versuche es verlangen, möglichst variabel sein soll. Ein anderes, gelegentlich ebenfalls nützliches Hilfsmittel, die Tonhöhe im Sinne einer Verringerung zu ändern, besteht darin, daß man am Rande der Scheibe oder an deren Achse eine Feder unter gewissem Druck schleifen und somit bremsend wirken läßt.

Dem Prinzip der Cagniardschen Sirene haftet der erhebliche Mangel an, daß man die Tonhöhe und die Tonstärke nicht voneinander unabhängig machen kann. Je stärker der Luftstrom genommen wird, um so kräftiger drückt er eben auch die Scheibe vorwärts, und um so höher wird der Ton. Wo dieser Umstand sich unangenehm fühlbar macht, wird man deshalb die Löcher lieber senkrecht bohren, so daß die Stärke des Windes auf ihren Lauf keinen Einfluß mehr hat. Helmholtz hat denn auch (vgl. Fig. 54) der neueren Konstruktion seiner Doppelsirene diese Form gegeben, wodurch freilich ein besonderer Antriebsmotor nötig wurde. Er ließ zu diesem Zwecke eine elektromagnetische Maschine von konstanter Rotationsgeschwindigkeit bauen[1]). Ein rotierender Elektromagnet, in welchem die Stromrichtung bei jeder halben Umdrehung gewechselt wird, bewegt sich zwischen zwei festen Magnetpolen. Der Strom in diesem Elektromagneten wird durch die Zentrifugalkraft einer an der Umdrehungsachse desselben befestigten Metallmasse unterbrochen, sobald die Geschwindigkeit den verlangten Grad zu überschreiten anfängt. Zwei Spiralfedern, deren Elastizität der Zentrifugalkraft entgegenwirkt, können nach Belieben stärker oder schwächer gespannt werden, so daß die Umlaufsgeschwindigkeit auf jedem beliebigen Grade zu erhalten ist. Später (1875) wurde die Maschine noch dadurch verbessert, daß der Zentrifugalregulator von ihr getrennt wurde und nur den schwachen Strom für ein Relais öffnet und schließt, welches letztere erst den starken Strom, der die Maschine treibt, ein- oder aussetzen läßt.

Eine Cagniardsche Sirene mit gerade gebohrten Löchern und elektrischem Antrieb hat neuerdings auch H. Pellat[2]) durch Ducretet und

1) Vgl. hierzu: S. Exner, Sitzungsber. d. Wiener Akademie, Math.-Naturw. Kl., Bd. 58, Abteilg. 2, 1868, 8. Oktober.

2) Journal de Physique, 3. Serie, Bd. 4, S. 366, 1895.

Lejeune in Paris konstruieren lassen. Der Motor ist ein kleiner, auf dem Grundbrett des ganzen Apparates montierter Grammescher Dynamo, dessen Ring mit der Sirenenscheibe die Rotationsachse gemeinschaftlich hat. Eine elektromagnetische Dämpfungsvorrichtung reguliert die Geschwindigkeit, und man kann bequem von einer Tonhöhe zur anderen übergehen.

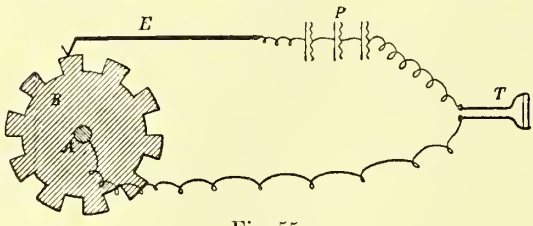


Fig. 55.

Auf dem Prinzip, durch periodische Unterbrechungen eines elektrischen Stromes in einem mit ihm verbundenen Telephon einen Ton zu erzeugen, beruht die elektrische Sirene von R. Weber[1]). Zur Erläuterung des Grundgedankens diene Fig. 55. Auf den Zähnen des Rades R schleift die Feder E, die am anderen Ende mit dem einen Pole einer galvanischen Batterie P verbunden ist. Der zweite Pol steht mit dem Telephon T und

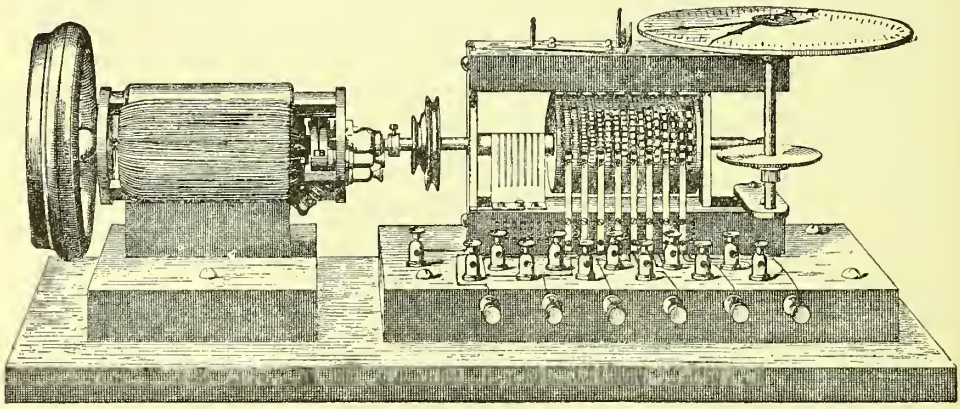


Fig. 56.

dieses wieder mit der Achse A des metallenen Rades in leitender Verbindung. Bei der Rotation des Rades hört man im Telephon einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Anzahl der Stromunterbrechungen pro Sekunde ist. Füllt man die Zahnlücken mit Isoliermasse und bringt man mehrere solche gleich große, aber mit verschieden vielen Zähnen versehene Scheiben, voneinander isoliert, auf dieselbe Achse, so erhält man in Form eines massiven, gut abgedrehten Zylinders mit glatter Oberfläche den Hauptteil der in Fig. 56 dargestellten Sirene. Der Zylinder derselben zeigt 16 Zahnkränze, denen bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit 16 verschiedene Töne entsprechen. Jeder Kranz hat seinen besonderen Schleifkontakt; der positive Pol ist allen gemeinsam, der negative für jeden ein anderer, und es sind so viele Elemente nötig, als Zahnkränze gleichzeitig benutzt werden sollen.

1) Wiedemanns Annalen der Physik u. Chemie, Bd. 24, S. 671, 1885.

Der links in der Abbildung befindliche Teil der Maschine ist der Elektromotor mit dem Schwungrad als Regulator; rechts ist das Zählwerk sichtbar.

Die Telephonsirene von L. Weber, die von Karsten[1]) vervollkommnet wurde, besteht aus einer mit kleinen Magneten radial besetzten Messing- oder Pappscheibe, die in Umdrehung versetzt wird, während ein von seiner Membran befreites Telephon ihrem Rande genähert ist. Man hört alsdann in einem zweiten, mit dem ersten verbundenen Telephon einen Ton, dessen Schwingungszahl von der Tourenzahl und der Anzahl der Magnete abhängt. F. Lindig[2]) hat diesen, ursprünglich nur zur Erläuterung der Wirkung des Telephons dienenden Apparat zum Zwecke akustischer Untersuchungen, namentlich über den Einfluß von Phasenverschiebungen auf die Klangfarbe, modifiziert. Er ordnete zunächst die Magnete auf der aus dünnem Aluminiumblech bestehenden Scheibe so, daß sie entweder alle den gleichen Pol nach außen kehrten oder abwechselnd einen Nord- und einen Südpol. Die „Gleichpole" geben durch ihre Zahl auch die Zahl der Stromstöße während einer Umdrehung der Scheibe, die „Wechselpole" dagegen nur halb so viele Stromstöße, als ihre Zahl beträgt, weshalb man im zweiten Falle einen Ton bekommt, der eine Oktave tiefer ist als im ersten. An Stelle des membranlosen Telephons verwandte Lindig als Stromempfänger vier Spulen von umsponnenem Kupferdraht, die um einen Kern von ausgeglühten Eisendrähten gewickelt waren. Je zwei Spulen waren zu einem einheitlichen System und alle vier mit dem tongebenden Telephon verbunden. Stehen alle Spulen gleichzeitig vor gleichen Polen, so verstärken sie sich gegenseitig; steht aber die eine Hälfte vor Nord- und die andere vor Südpolen, so erhält das Telephon zwei Tonwellen mit der Phasendifferenz $^1/_2$. Bei Gleichpol-Anordnung der Magnete entspricht dem gleichen Phasenunterschied eine Lage der Spulen, bei der deren halbe Anzahl aus der Polgegenüberstellung in die Mitte zwischen je zwei Pole verschoben ist. Soll die Phase zwischen den beiden ins Telephon gelangenden Tonwellenzügen kontinuierlich geändert werden, so braucht man nur das eine Spulensystem vor den rotierenden Magneten hin und her zu bewegen, während das andere in Ruhe bleibt. Verbindet man zwei auf derselben Achse rotierende Telephonsirenenscheiben der geschilderten Art, bei denen die Zahl der Magnete verschieden ist, mit dem Telephon, so kann man in diesem gleichzeitig zwei verschieden hohe Töne, also beliebige Zweiklänge, erzeugen, und zwar ebenfalls mit allen möglichen Phasenunterschieden, indem man das Spulensystem der einen Scheibe verschieblich gegenüber den Magneten anbringt. In Figur 57 ist die Telephonsirene unter Weglassung der Verbindungsdrähte und des die Rotation besorgenden Uhrwerkes[3]) abgezeichnet. E_1 ist das fixe Spulensystem, das mittelst der Röhre R und des festen Endstückes A_1 vor dem Versuch gehoben oder gesenkt, der Scheibe genähert oder zurückgezogen werden kann. Das andere Spulenpaar E_2 ist an dem Arm A_2 befestigt und mit diesem um H längs der Skala S im Kreise drehbar zu

1) Schriften d. Naturw. Vereins f. Schleswig-Holstein, Bd. 3, Heft 2. S. 27, Kiel 1879.

2) Über den Einfluß der Phasen auf die Klangfarbe: Kieler Dissertation 1902 und Annalen der Physik, 4. Folge, Bd. 10, S. 242, 1903.

3) Es war das Uhrwerk des Kohlrauschschen Sinusinduktors. Vgl. Poggendorffs Annalen, Jubelband, S. 290 ff., 1874.

verstellen. Die Spulen sitzen vermittelst Korken auf zwei Kreisbögen, die mit der rotierenden Scheibe den Mittelpunkt gemeinsam haben, und lassen sich, je nachdem die Distanz der Magnete es erfordert, gegen- oder auseinander rücken. Die von der Telephonsirene gelieferten Töne fand Lindig nicht rein. Vielmehr waren die Grundtöne von Obertönen begleitet, die allerdings mit zunehmender Schwingungszahl mehr und mehr zurücktraten; bei gleichliegenden Polen entwickelte sich die ganze Reihe der harmonischen Obertöne, bei Wechselpolen nur die ungeraden Teiltöne. Die Tonhöhen der Grundtöne lagen zwischen 30 und 600 Doppelschwingungen.

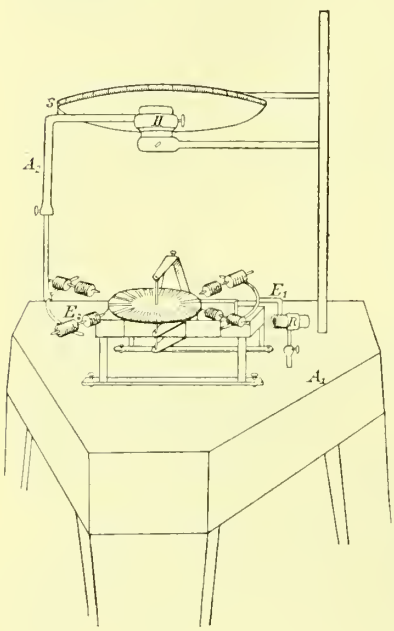


Fig. 57.

Die von Max Wien[1]) beschriebene Wechselstromsirene besteht aus einer in vertikaler Ebene zwischen den Polen eines Magneten rotierenden, am Rande gezähnten Messingscheibe, bei der die Zahnlücken durch Eisenkerne ausgefüllt sind. So oft ein Eisenanker an den Polen vorbeikommt, ändert sich in den Polen die Zahl der magnetischen Kraftlinien, und es entsteht so in einer um die Pole gewickelten Spule ein Wechselstrom, dessen Frequenz das Produkt aus der Zahl der Anker und der Tourenzahl ist und von Wien bis auf 17000 gesteigert werden konnte. Die Ströme dieser Art sind aber schwach und nicht sinusförmig, so daß die Grundschwingung noch von Oberschwingungen überlagert ist, von denen allerdings die der Oktave entsprechende bei weitem überwiegt. Die Grundschwingung kann indessen, und zwar für sich allein, durch das Hilfsmittel der elektrischen Resonanz erheblich verstärkt werden. Die Intensität des Wechselstromes ist nämlich abhängig von dem „scheinbaren Widerstand", und dieser wieder wesentlich durch die Selbstinduktion in dem Stromkreise bedingt. Kompensiert man nun die Selbstinduktion durch einen passenden Kondensator für die Schwingungszahl des Grundstromes, so wird dieser verstärkt, während die Oberströme, für die der scheinbare Widerstand groß bleibt, nicht mit verstärkt werden. Das die Wechselstromschwingungen in Schallschwingungen umsetzende Telephon wird in einen passenden Nebenschluß zum Hauptzweig gelegt. Durch Widerstandsänderungen läßt sich die Tonstärke bis zur Hörschwelle herabsetzen, und wo noch Bedenken wegen der Oberschwingungen bestehen, kann im Telephonkreis nochmals eine Reinigung des Stromes von Oberströmen durch elektrische Resonanz bewirkt werden.

1) Annalen der Physik, 4. Folge, Bd. 4, S. 425 ff., 1901; Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie, Bd. 97, 1903.

Am Schlusse dieses Kapitels ist noch mit einigen Worten der Koenigschen Wellensirene zu gedenken. Koenig schnitt Sinuswellen oder durch die Superposition von solchen gewonnene Klangkurven am Rande von Kreisscheiben oder niedrigen Zylindern aus und blies sie mit einem senkrecht zur rotierenden Oberfläche gerichteten Luftstrom durch einen schmalen Spalt hindurch an. Es kam ihm hierbei hauptsächlich auf Versuche zur Vokalsynthese und zum Beweise des von ihm behaupteten Einflusses der Phasenverschiebung auf die Klangfarbe an. Da aber von anderer Seite mehrfach nachgewiesen worden ist, daß bei dieser Art der Klangerzeugung außer den Komponenten der Kurve selbst auch noch andere Faktoren in verwickelter Weise ins Spiel kommen, bietet die „Wellensirene" viel mehr Interesse für die physikalische Akustik[1]) als für die Physiologie des Gehörssinnes.

2. Resonanz und Resonatoren.

Die Erscheinungen des Resonierens, Mittönens oder Mitschwingens zerfallen in zwei Gruppen. Der typische Repräsentant der ersten ist der Resonanzboden unserer musikalischen Saiteninstrumente. Hier handelt es sich darum, den an sich schwachen Ton der Saite erst auf die verhältnismäßig große Oberfläche eines festen Körpers und von da aus um so viel wirksamer auf die Luft zu übertragen. Ebenso setzt man auch wohl gelegentlich eine Stimmgabel mit ihrem Stiel auf eine Tischplatte, wodurch bis zu etwa 2000 Schwingungen aufwärts der Ton mehr oder weniger erheblich verstärkt wird; freilich auf Kosten seiner Dauer. Die andere Gruppe umfaßt diejenigen Fälle, wo eine Tonquelle lediglich durch die Aussendung ihrer Schwingungen eine von diesen getroffene zweite zum Mitklingen bringt. Die erregte Tonquelle braucht dabei der erregenden nicht gleichartig zu sein, muß aber auf dieselbe Tonhöhe entweder abgestimmt sein oder sich einstellen lassen.

Wenn die Schwingungszahl des ursprünglich tönenden Körpers nicht ganz genau mit der des mittönenden übereinstimmt, so schwingt der letztere zwar auch wohl noch mit, aber desto weniger, je größer die Differenz der Tonhöhen ist. In dieser Beziehung zeigen indessen die verschiedenen tönenden Körper sehr große Unterschiede, je nachdem sie, einmal in Schwingungen versetzt, längere oder kürzere Zeit selbständig fortklingen, ehe sie durch die Abgabe ihrer Bewegung an die Luft zur Ruhe kommen. Massige und schwer bewegliche Körper, die langsam ausklingen, wie Glocken und Platten, sind nur schwer von der Luft in Bewegung zu setzen. Ganz besonders gilt dies auch von den Stimmgabeln, bei denen nach Helmholtz[2]) die Zeit, welche sie brauchen, um durch Mittönen in volle Schwingung zu kommen, von merklicher Größe ist und die allerkleinste Verstimmung — etwa Vertiefung der einen durch Ankleben eines Wachsklümpchens an eine der Zinken — genügt, um die gegenseitige Erregung erheblich zu schwächen. Rasch verklingende Körper von geringer Masse, wie gespannte Membranen oder Violinsaiten, sind leichter zum Mitschwingen zu bringen und werden

1) Näheres s. bei Auerbach, Akustik, Bd. 2 d. Handbuches d. Physik von Winkelmann, Leipzig 1909, S. 183 u. 267 ff.

2) Lehre von den Tonempfindungen; 5. Ausgabe, S. 68.

auch von solchen hinreichend starken Lufterschütterungen merklich bewegt, welche nicht ganz die gleiche Schwingungsdauer haben, weshalb denn auch bei ihnen die Grenzen des Tonbereiches, innerhalb dessen das Mitschwingen stattfindet, entsprechend weiter auseinander liegen. Durch den verhältnismäßig größeren Einfluß der Luftbewegung auf solche leichte und wenig widerstandsfähige elastische Körper kann deren eigene Schwingungsdauer etwas verändert werden, so daß sie sich der des erregenden Tones anpaßt.

Die Resonanz der Stimmgabeln auf Schallkasten und der Saiten benutzt man in der physiologischen Akustik öfter zum objektiven Nachweise der Existenz des einen oder anderen Partialtones in einer Klangmasse, also zur Klanganalyse. Bei der Stimmgabel überzeugt man sich davon, ob der betreffende Teilton sie zum Mittönen gebracht hat oder nicht, in der Weise, daß man das Ohr vorsichtig der Öffnung des Resonanzkastens nähert. Man vermeide während des Versuches, die Gabel anzufassen oder anzustoßen. Denn wenn sie gut gearbeitet ist, besitzt sie eine so große Empfindlichkeit, daß schon eine rasche Annäherung ans Ohr oder ein etwas zu festes Hinstellen genügt, um sie durch die bloße mechanische Erschütterung in Schwingungen zu versetzen. Bei den Saiten kann man vielfach das Mittönen auch optisch konstatieren, indem man entweder die Verbreiterung, welche die Saite beim Vibrieren erfährt, direkt beobachtet, oder vor dem Versuch ein Papierreiterchen aufsetzt, das dann beim Schwingen abfliegt.

Durch ihr leichtes Ansprechen und ihre Resonanzbreite ausgezeichnet sind die abgestimmten Luftvolumina. Sie werden daher auch mit besonderer Vorliebe als Resonatoren verwendet, d. h. als Mittel, einen gegebenen Ton entweder lediglich in seiner Intensität zu steigern oder ihn eben durch die Verstärkung aus einem Tongemenge zum Zwecke der Analyse herauszuheben. Irgendein Lampenzylinder, eine Pappröhre, eine Wasser- oder Tintenflasche vermag zum Beispiel eine darüber gehaltene Stimmgabel von passender Schwingungszahl kräftig zu verstärken. Ist es nötig, einen solchen Resonator erst genauer abzustimmen, so läßt sich dies bei einer beiderseits offenen Glas- oder Metallröhre durch Eintauchen in ein Wasserbassin, bei Flaschen durch Ein- und Ausgießen von Wasser leicht erreichen. In letzterem Falle kann man, um das Verfahren noch zu vereinfachen, zwei Flaschen nach Art der kommunizierenden Röhren vereinigen, so daß das Füllen und Entleeren der einen durch Heben und Senken der anderen erfolgt, oder aber die am Boden befindliche Ausflußöffnung einer Flasche mit einem Wasser enthaltenden Gummigebläse-Ballon verbinden, der, wenn er komprimiert wird, das Wasser nach Bedarf in die Flasche eintreten läßt.

Ihre vollste Wirksamkeit entfalten die Resonatoren indessen erst, wenn man sie in unmittelbare Verbindung mit dem Ohre bringt, was am besten in jener Form geschieht, die Helmholtz angegeben hat[1]). Seine Instrumente, in Fig. 58 abgebildet, sind gläserne oder metallene Hohlkugeln oder Röhren mit zwei Öffnungen, deren eine (*a*) einen scharf abgeschnittenen Rand hat, während die andere (*b*) so trichterartig geformt ist, daß man sie in das Ohr einsetzen kann. Die Luftmasse eines solchen Resonators bildet in Verbindung mit der des Gehörganges und mit dem Trommelfell ein elastisches

1) Lehre von den Tonempfindungen: 5. Ausgabe, S. 73.

System, welches namentlich beim Erklingen des Grundtones seiner Abstimmung in großer Stärke mitklingt.

Horcht man mit einem ins Ohr eingeführten Helmholtzschen Resonator auf einen sehr schwachen Ton, so empfindet man das beständige leise Sausen in dem Hohlraum und sein gelegentliches Ansprechen auf zufällige Nebengeräusche nicht selten störend. In solchen Fällen ist es oft nützlicher, die Schallöffnung (*a* in Fig. 58) in die Nähe des Ohres zu bringen und die andere (*b*) abwechselnd mit dem Finger zu verschließen und wieder freizugeben, wobei die Tonverstärkung im Resonator intermittierend auftritt, was ihre Deutlichkeit wesentlich erhöht. Soll ein nicht zu leiser Teilton eines Klanges verstärkt werden, so nähere man die Schallöffnung der Klangquelle, also beispielsweise der angeblasenen Löcherreihe einer Seebeckschen Scheibe

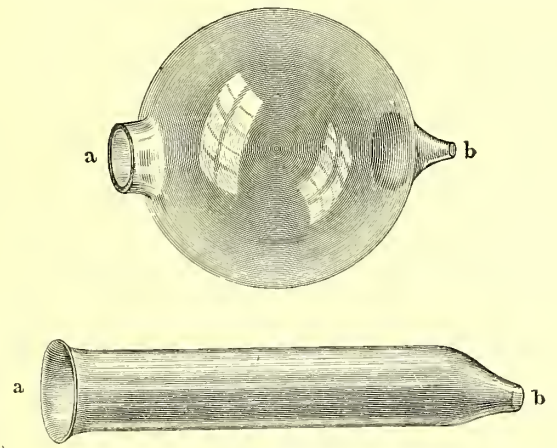


Fig. 58.

oder einem Telephon, und manipulicre mit der anderen, wie eben angegeben. Dieses Verfahren steht zwar an Empfindlichkeit der Methode, den Resonator direkt ans Ohr zu bringen, nach, hat aber dafür den Vorteil, daß die Resonanz mehreren Personen gleichzeitig demonstriert werden kann. Die Intermissionen beim wechselweisen Öffnen und Sehließen der fürs Ohr bestimmten Resonatormündung rühren daher, daß dem Verstärkungsmaximum des beiderseits offenen Resonanzraumes eine etwas höhere Schwingungszahl entspricht als dem des einseitig gedeckten. Je nachdem also der ganz oder der nur auf der einen Seite offene Resonator besser auf den zu verstärkenden Ton anspricht, wird letzterer entweder durch das Auflegen des Fingers oder durch das Abheben geschwächt, wenn nicht total unterdrückt.

Formeln und Maße für die Kugelresonatoren hat Helmholtz in Beilage II der „Lehre von den Tonempfindungen“ angegeben; in Beilage IV für die zylindrischen Resonatoren, die er in Verbindung mit den elektromagnetisch erregten Stimmgabeln für seine Versuche zur Vokalsynthese benutzte. Diese zylindrischen Röhren waren auf der einen Seite ganz geschlossen, auf der anderen hatten sie eine zentrische Öffnung, deren Durchmesser aber kleiner war als der der Röhre. Durch die Verengerung der

Öffnung, die zugleich den Resonator tiefer stimmt, erzielt man eine größere Verstärkung, aber es wird auch eine um so genauere Kongruenz der Tonhöhe des zu hörenden Tones mit dem Eigentone des Resonators notwendig. Die in akustischen Laboratorien meist gebräuchlichen Zylinderresonatoren aus Blech oder Pappe sind an dem einen Ende vollständig offen und am anderen mit einer Platte gedeckt, die nur in der Mitte eine kleine kreisrunde Öffnung hat, über welcher sich ein kurzer, zur Einführung ins Ohr bestimmter, hohler Kegel erhebt. Ihre Länge stimmt annähernd überein mit der Viertelwellenlänge desjenigen Tones, der (als Grundton) am kräftigsten von der Röhre verstärkt werden soll. Außer den kugelförmigen und zylindrischen hat man auch noch konische Resonatoren, wie sie zuerst von Appunn in Hanau aus dünnem Zinkblech auf Veranlassung von Helmholtz verfertigt wurden. Bei diesen ist die Länge nahezu jener der offenen Orgelpfeifen von der nämlichen Tonhöhe gleich zu machen.

Die Kegelresonatoren verstärken nach Helmholtz außer ihrem Grundtone auch alle harmonischen Obertöne desselben. Daß dies, obschon in relativ geringem Grade, von den kugelförmigen ebenfalls gilt, haben systematische Versuche gezeigt, die ich vor Jahren im Psychologischen Institut der Berliner Universität mit freundlicher Unterstützung seitens des Herrn Cand. med. O. Pfungst ausführte. Bezüglich der zylindrischen Röhren fanden wir, daß sie außer auf den Grundton so gut wie ausschließlich auf die ungeradzahligen Töne der harmonischen Reihe reagieren, unter denen wieder die Duodezime bevorzugt ist, was als Vorteil gelten darf in solchen Fällen, wo es sich um möglichst geringe Betonung der Oktave handelt.

Für gewöhnlich rechnet und arbeitet man indessen nur mit den Grundtönen der Resonanzräume. Am lebhaftesten werden als solche die Töne mittlerer Höhenlage verstärkt. Unterhalb G und oberhalb g^3 beginnt die Intensitätssteigerung durch Resonanz mehr und mehr zu versagen, so daß für die meisten Zwecke ein Resonatoren-Instrumentarium, welches die Tonstrecke von c^0 bis e^3 umfaßt, vollkommen ausreicht. Dabei ist es nicht durchaus nötig, für jede einzelne Schwingungszahl einen besonderen Resonator zu besitzen. Jedem Helmholtzschen Resonator entspricht zwar eine ganz bestimmte Grundtonhöhe, auf die er am besten abgestimmt ist und die er daher am meisten verstärkt, aber auch die diesem Optimum benachbarten höheren und tieferen Töne erfahren noch eine, wenngleich mit wachsender Distanz abnehmende Stärkezunahme, die ich gelegentlich bei einzelnen, sowohl kugeligen wie zylindrischen Resonatoren noch bis zu 100 und mehr Schwingungen aufwärts und abwärts vom Optimum merklich gefunden habe. Unter diesen Umständen kann man die Umfassung eines größeren Tonbereiches zur Not schon mit einer relativ beschränkten Zahl von Resonatoren ermöglichen. Sofern man aber auf die gleich gute Verstärkung aller möglichen Töne Gewicht legt, wird doch das Instrumentarium wegen der dann erforderlichen Menge der Einzelexemplare unhandlich und teuer.

Das Ideal ist daher ein kontinuierlicher oder Universal-Resonatoren-Apparat, der auf jede beliebige Tonhöhe zwischen mindestens c^0 und c^3 eingestimmt werden kann, der den jeweils in Frage kommenden Ton maximal verstärkt, einfach zu handhaben, kompendiös und möglichst billig ist. Dieses Ziel hat Edelmann vor einigen Jahren durch die Kon-

struktion einer „kontinuierlichen Tonreihe aus Resonatoren mit Resonanzböden“ zu erreichen gesucht[1]). Die Reihe besteht aus 5 Kugelresonatoren (*A* bis *E* in Fig. 59) und 72 Diaphragmen, deren Form die Bilder *a* bis *e* der Fig. 59 wiedergeben und die der leichteren Übersichtlichkeit und Verwendung halber in Reihen von je 12 Stück (eine Oktave) in Holzleisten eingelassen und geordnet sind. Die Diaphragmen passen in die Schallöcher der Kugeln und stimmen in jedem Falle vermöge ihrer entsprechenden Lochweite den zugehörigen Resonator auf denjenigen Eigenton ab, der auf dem Diaphragma verzeichnet ist. Auf diese Weise soll die ganze Reihe aller Halbtöne der 6 Oktaven von C_1 bis c^4, genau konform der Bezoldschen Tonreihe, verstärkbar gemacht werden. Der Schlauch *r* in Fig. 59 dient zur Verbindung der hinteren Resonatoröffnung mit dem Ohre. Die ebenfalls

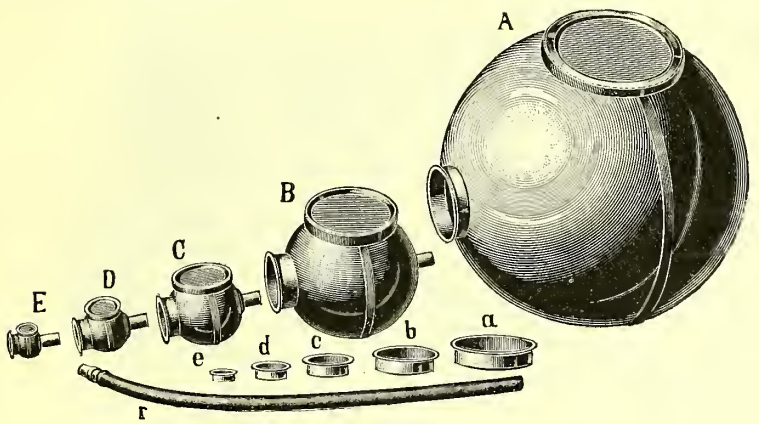


Fig. 59.

in der Abbildung sichtbare, in die Wand der Kugeln eingesetzte Platte aus Holz soll als Resonanzfläche dienen. Setzt man auf ihre Mitte den Stiel einer mit dem Resonator unisonen Bezoldschen Gabel, so kommt nach Edelmann deren Ton rein[2]) und mit außerordentlich hoher Intensität zur Wahrnehmung.

Wesentlich billiger und meines Erachtens auch handlicher als die Edelmannsche Resonatorenreihe, ohne ihr dabei an Schallkraft nachzustehen, ist der nach meinen Angaben[3]) von Herrn Mechaniker E. Zimmermann (Leipzig, Emilienstr. 21 und Berlin N., Chausseestr. 6) verfertigte und zu beziehende „kontinuierliche Resonatorenapparat“, welcher auf dem, übrigens schon von R. Koenig und anderen praktisch verwerteten Gedanken beruht,

1) Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 53, S. 340 ff. und Leitfaden der Akustik für Ohrenärzte, Berlin 1911, S. 72 ff.

2) Daß der Ton wirklich ganz „rein“, d. h. sinusförmig, zum Ohre gelangt, kann deswegen nicht zutreffend sein, weil alle Bezoldschen Gabeln harmonische Obertöne besitzen und diese, wenn auch viel schwächer als der Grundton, ebenfalls, wie oben erwähnt, vom Resonator verstärkt werden.

3) K. L. Schaefer, Ein kontinuierlicher Resonatorenapparat; Passows und Schaefers Beiträge z. Anat. usw. des Ohres usw., Bd. 3, S. 132 ff., 1910.

einen Zylinderresonator dadurch stimmbar zu machen, daß man ihn aus zwei genau aufeinander passenden und ineinander verschieblichen Röhren herstellt und so eine Verlängerung und Verkürzung nach dem Modus der Teleskope ermöglicht. Der Apparat (Fig. 60) besteht aus 4 derartigen, verschieden langen, im übrigen aber genau übereinstimmend gebauten Messingzylindern[1]). Die inneren Röhren sind mit einer Millimeterskala versehen, die bei jeder Einstellung unmittelbar die ganze lichte Länge abzulesen gestattet, so daß der Resonator mit einem Griffe auf irgendeine gewünschte Länge gebracht oder, mit anderen Worten, auf jede beliebige Tonhöhe innerhalb seines Bereiches genau eingestimmt werden kann. Die 4 Resonatoren schließen sich so aneinander, daß sie zusammen das gesamte Tongebiet von c^0 bis c^3 umfassen; doch vermag der tiefste bei größter Länge

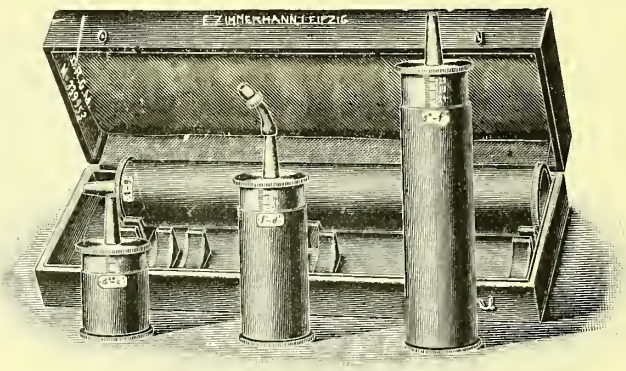


Fig. 60.

noch den Ton A und der höchste bei maximaler Kürze noch die Töne bis g^3 zu verstärken. Alle 4 Röhren sind für 18° C. und für die Töne der 12stufig temperierten Leiter mit $a^1 = 435$ v. d. geeicht. Die einzelnen Tonhöhen c, d, e, f, g, a, h sind in Buchstabenform mit ihrer Oktavenbezeichnung neben dem zugehörigen Teilstrich der Millimeterskala eingraviert, die dazwischen liegenden Halbtöne aus Gründen der Übersichtlichkeit nur durch Striche markiert. Zur bequemen Einführung in das Ohr empfiehlt es sich, das Ansatzrohr mit einem der beigegebenen kurzen Stücke Gummischlauch (mit Ansatzbirne) zu überziehen. (Vgl. den mittleren Resonator vorn in Fig. 60.) Werden die Resonatoren außer Verbindung mit dem Ohre benutzt, so muß, was wohl zu beachten ist, die Öffnung des Ansatzrohres durch den Finger oder noch besser durch einen Gummipfropfen gedeckt werden, weil sonst die Eichung, die sich auf den Verschluß des Resonators durch das Trommelfell bezieht, ungenau wird.

Eine von Rudolf Koenig erfundene, für manche Versuche und namentlich Demonstrationen sehr zweckmäßige Methode, das Ansprechen eines Resonators sichtbar zu machen, besteht darin, denselben mit einer

1) Preis, einschließlich des 48 cm langen, 9 cm hohen, 16,5 cm breiten Etuis: 125 Mark.

sogenannten manometrischen Flamme[1]) zu kombinieren. Das zu einer solchen gehörige Instrumentarium zeigt Fig. 61. In der unteren Abbildung links sieht man eine, auf einem Stative befestigte, mit Gasschlauch und Schallzuleitungsrohr versehene „manometrische Kapsel". A ist ein Vertikalschnitt derselben, der ihren Bau im Einzelnen veranschaulicht. Der eigentliche Kapselhohlraum ist durch eine Membran in zwei Teile, Schallkammer (links) und Gaskammer (rechts) zerlegt. In erstere führt das Schallleitungsrohr, in letztere (rechts unten) das Gasrohr. Aus der nach oben umgebogenen feinen Röhre brennt die Flamme. Werden in der Schallkammer — etwa durch Hineinsingen in den Trichter der Fig. 61 oder durch

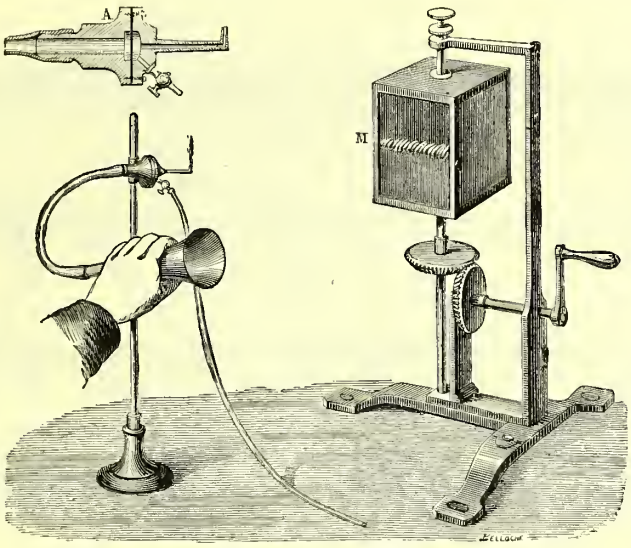


Fig. 61.

Verbindung eines tönenden Resonators mit der Schallzuleitungsröhre — Verdichtungen und Verdünnungen der Luft erzeugt, so gerät die Membran in konforme Bewegungen und überträgt dieselben auf das Gas, wodurch die Flamme veranlaßt wird, im Tempo der Membranschwingungen auf und nieder zu zucken. Die Oszillationen geschehen freilich so schnell und regelmäßig, daß die Flamme, unmittelbar betrachtet, ganz ruhig erscheint. Doch kann man ihren besonderen Zustand zunächst schon an der veränderten Gestalt und Farbe wahrnehmen. Um z. B. Schwebungen zweier im Resonator wiederhallender Töne zu erkennen, genügt der bloße Anblick der Flamme, indem diese dabei zwischen ihrer ruhenden und ihrer oszillierenden Form wechselt. Will man aber die einzelnen Vibrationen sehen, so betrachtet man sie am besten, wie es schon Wheatstone getan, in einem parallelepipedonischen rotierenden Spiegel (M in Fig. 61), in welchem die nicht zitternde Flamme zu einem langen, gleichmäßigen Lichtstreifen ausgezogen erscheint, die

1) Vgl. hierzu R. Koenig: Die manometrischen Flammen; Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 146, S. 161, 1872.

zuckende dagegen in eine Reihe einzelner Lichtbildchen zerfällt[1]). Fig. 62 gibt einige derartige Fammenzackenbilder wieder. Die oberste Reihe entspricht einem Tone, der dreimal soviel Schwingungen macht wie jener der mittleren Reihe; die unterste zeigt den Effekt der gleichzeitigen Zuleitung beider Töne zur Schallkammer der Kapsel. Fig. 63 ist die Abbildung eines von R. Koenig konstruierten und zu klanganalytischen Versuchen bestimmten Apparates, der aus 8 Kugelresonatoren[2]), entsprechend dem Grundtone c^0 und seinen harmonischen Obertönen, aus ebenso vielen Flammen — je einer für jeden Resonator — und einem Drehspiegel mit Handantrieb besteht. (Die Gummischläuche, welche die Flammen mit den Resonatoren verbinden, und der Anschluß an die Gasleitung befinden sich auf der Rückseite des Instrumentes.)

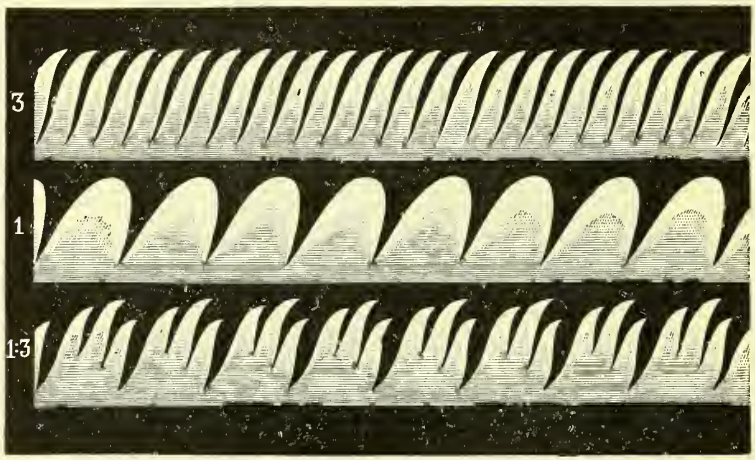


Fig. 62.

Ein äußerst empfindliches Mittel, die Schwingungen der Luft in einem Resonator sichtbar zu machen, fand Helmholtz in flachen Flüssigkeitshäutchen aus glyzerinhaltigem Seifenwasser, womit man die Öffnung überzieht. Das Verfahren ist sehr einfach. In einer zur Häfte mit Leitungswasser gefüllten Abdampfschale verrührt man so lange ein gewöhnliches Stück Seife, bis kräftiges Schäumen eintritt, und setzt dann Glyzerin hinzu, jedoch nur so viel, daß die Mischung nicht zu dickflüssig wird. Hierauf gießt man die Seifenlösung in eine flache Schüssel und taucht die Schallöffnung des Resonators nach sorgfältiger Beseitigung der Schaumbläschen hinein. Dieselbe bedeckt sich dabei mit einem Häutchen, welches sehr scharf das Bild des Fensterkreuzes oder einer Gasflamme spiegelt. Sobald der Resonator erregt wird, verwischen sich die Konturen des Bildes, und die Flamme er-

1) Für orientierende Vorversuche genügt es, einen gewöhnlichen Taschenspiegel so hin und her zu schwingen, daß das Flammenbild darin zu einem Streifen verbreitert wird.

2) R. Koenig hat auch eine Modifikation des Instrumentes mit verstimmbaren Zylinderresonatoren angegeben. (Gegenwärtige Bezugsquelle: Präzisionsmechanische Werkstätten von Max Kohl in Chemnitz.)

scheint im Drehspiegel gezähnt. Zuweilen treten auch Kräuselungen und andere Deformationen des Häutchens auf.

Als eine besondere Abart der Resonatoren kann man die Resonanzkasten der Stimmgabeln betrachten. Die Gabel und der mit ihr belastete Kasten bilden zusammen ein elastisches System, dessen einzelne Teile sich gegenseitig beeinflussen. Weicht der Eigenton des Hohlraumes, der „Luftton", vom Gabelton merklich ab, so verändert er auch dessen Tonhöhe ein wenig. Außerdem kommt der Eigenton der Kastenwandungen, der

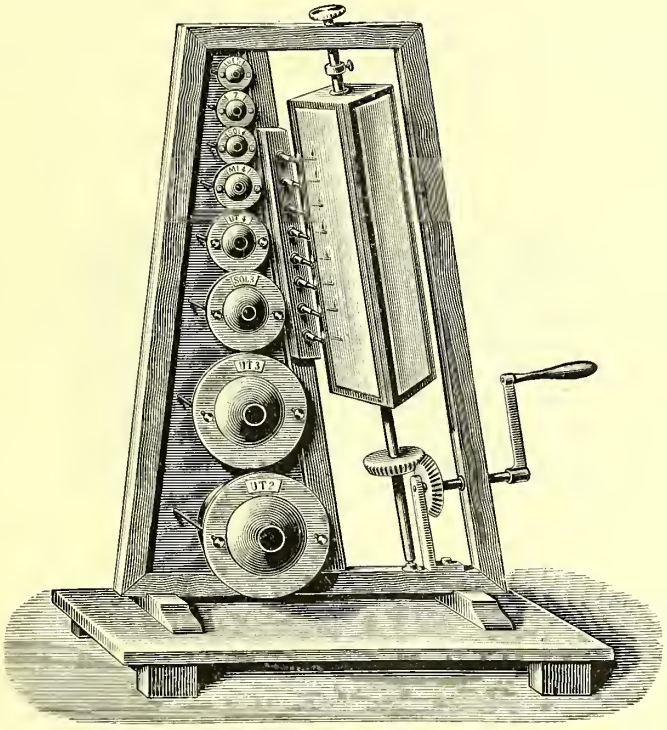


Fig. 63.

„Holzton" in Betracht. Den Luftton vernimmt man, wenn man leise über den Rand des Kastens bläst. Um den Holzton zu hören, füllt man den Kasten ganz mit Baumwolle aus, klemmt einen Kork zwischen die Gabelzinken und klopft mit einem Korkhammer von oben auf die Zinkenenden. Einen zu hohen Holzton kann man durch Abhobeln der oberen und unteren Kastenfläche vertiefen. Erst wenn der Holzton nahezu mit dem Gabelton und Luftton identisch ist, erhält man im Kasten kräftige Luftschwingungen; freilich wird bei maximaler Ausnutzung der Resonanz die Tondauer sehr vermindert [1]). — Soll der Resonanzkasten möglichst wenig Schall auf seine

1) Näheres über die Beziehungen zwischen Gabel und Kasten bei Kielhauser, Die Stimmgabel usw.; Leipzig 1907, S. 123 ff.

Unterlage übertragen, so bringt man unter dem Boden an den Ecken 4 Filzplättchen oder Kautschukschlauchstücke an.

3. Interferenzapparate.

Wenn zwei Tonwellenzüge von gleicher Schwingungszahl und Amplitude zusammen in eine Röhre eintreten, so hängt es ganz von ihrem Phasenverhältnis ab, mit welcher Stärke der Ton die Röhre durchläuft, beziehungsweise am anderen Ende verläßt. Bei vollkommener Phasengleichheit verstärken sich die beiden Einzeltöne maximal; bei genau entgegengesetzten Phasen, also einem Gangunterschied von einer halben Wellenlänge, löschen sie sich total aus; den zwischen diesen Extremen gelegenen Phasenverhältnissen entsprechen mittlere Grade der gegenseitigen Verstärkung oder

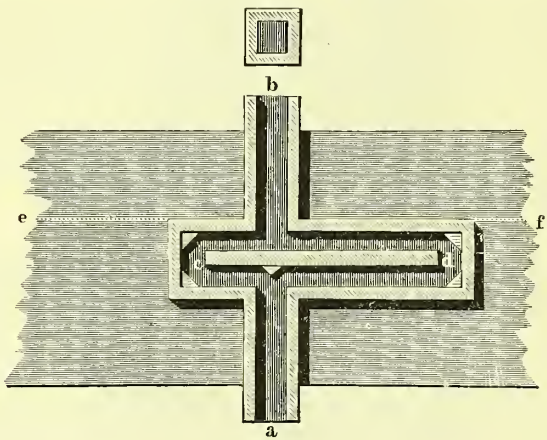


Fig. 64.

Schwächung. Auf diesen physikalischen Grundtatsachen beruhen alle jene Kombinationen von Röhren, die man als Interferenzapparate zu bezeichnen pflegt.

Sir John W. Herschel hat in einem Vortrag über die Absorption des Lichtes[1]) als erster den Gedanken ausgesprochen, „ein Beispiel von einer akustischen Kombination oder einem zusammengesetzten Vibrationssystem, welches unfähig ist, einen musikalischen Ton von gegebener Höhe durchzulassen", mittelst einer Pfeife zu erbringen, die sich in der Mitte so in zwei Schenkel gabelt, daß deren einer um eine halbe Wellenlänge des Pfeifentones länger ist als der andere. Zur experimentellen Ausführung dieser Idee ist Herschel selbst nicht gekommen. Sie liegt aber wohl den Versuchen mit „Nörrembergs akustischer Interferenzröhre" zugrunde, über welche Prof. Müller der Naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. B. in der Sitzung vom 16. Juni 1854 berichtete[2]). Die aus Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik[3]) entnommene Abbildung 64 zeigt den aus einem hohlen

1) Philos. Magazine, Ser. III, Vol. III, P. 401; Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 31, S. 251 f., 1834.

2) Berichte d. Naturf. Gesellsch. zu Freiburg i. B., Bd. 1. S. 43, 1858.

3) Neunte Aufl., Braunschweig 1902, S. 802.

Kreuz mit ungleichen Querschenkeln bestehenden und bei *ef* in eine zwei Zimmer trennende Mauer eingebauten Apparat. Ein bei *a* eintretender Ton gelangt über *c* und *d* nach *b* und ist dort unhörbar, wenn der Weg über *d* eine halbe Wellenlänge weiter ist als über *c*; er wird aber wieder vernehmlich, wenn man von *b* aus einen Schieber bis zur Trennungsfläche *cd* vorschiebt und so den einen Weg absperrt. Diese Nörrembergsche Röhre ist in Anbetracht der Einmauerung und der auf einen einzigen Ton beschränkten Anwendbarkeit wenig empfehlenswert zum Gebrauch. Viel zweckmäßiger sind schon die später von Quincke[1]) angegebenen einfachen Instrumente, welche die Figuren 65 a, b, c in $^1/_{10}$ der natürlichen Größe darstellen. Das Ende *A* wird mit dem Ohre verbunden, das Ende *B* beziehungsweise BB_1 dient der Zuleitung des Tones. Letzterer gelangt dann sowohl auf dem kürzeren Wege über *C* als auch auf dem längeren über C_1 ins Ohr und wird, wenn die Wegdifferenz eine halbe Wellenlänge beträgt, (fast) völlig vernichtet. Schaltet man bei Anwendung der Röhrenform Fig. 65 b den Zweig PP_1Q_1Q durch Zudrücken der Schlauchschaltstücke *P* und *Q* aus, so

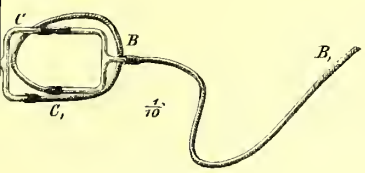


Fig. 65 a.

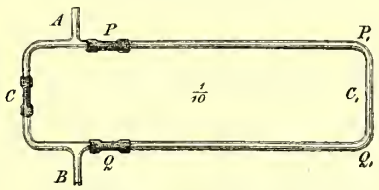


Fig. 65 b.

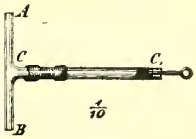


Fig. 65 c.

wird der Ton wieder hörbar; ebenso, wenn man bei *C* den Verschluß herstellt. In diesem Falle — und analog bei Absperrung des einen Zweiges der Röhrenform Fig. 65 a — muß man aber mit störenden Interferenzerscheinungen infolge von Reflexion der Welle an der Verschlußstelle rechnen. Auf einer solchen Reflexion beruht geradezu die Interferenzwirkung bei dem Apparate Fig. 65 c. Der verschiebliche Stöpsel bei C_1 muß hier für die Tondrosselung so eingestellt sein, daß CC_1 eine Viertelwellenlänge des Tones beträgt. Trifft dann bei *C* die Spitze einer Verdichtung — um diesen Phasenzustand als Beispiel zu nehmen — ein, so verteilt sie sich auf die Wege nach *A* und C_1. In C_1 angelangt, wird die Verdichtung als Verdichtung zurückgeworfen und kommt in *C*, also nach Zurücklegung einer Strecke gleich einer halben Wellenlänge, in dem Augenblicke wieder an, wo hier von *B* aus eine Verdünnung eintrifft, und in dieser Weise begegnen sich in *C* von *B* und C_1 her überhaupt ständig entgegengesetzte Phasen. [Statt der verschlossenen Röhre CC_1 in Fig. 65 e kann man auch einen offenen Kautschukschlauch von doppelter Länge bei *C* anbringen. Dieser löscht ebenfalls den Ton aus, da eine in ihn eindringende Verdichtung am freien Ende als Verdünnung umkehrt und als solche, nachdem im Schlauche ein Weg von einer ganzen Wellenlänge des betreffenden Tones zurückgelegt ist, in *C* gerade der nächstfolgenden Verdichtung begegnet. Schließt man das Schlauchende, so tritt Tonverstärkung ein, da nun die Verdichtung als

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 128, S. 177 ff., 1866.

Verdichtung reflektiert wird; Zuklemmen des Schlauches in halber Länge bewirkt wieder Auslöschung.]

Die Quinckeschen Röhren, Fig. 65 a und b, haben den Nachteil, immer nur für eine einzige Tonhöhe brauchbar zu sein. Man kann sie zwar durch Auswechseln der Schläuche oder Röhrenstücke umstimmen, indessen bedeutet die von R. Koenig[1]) konstruierte, nach Art der Teleskope ausziehbare Interferenzröhre jedenfalls einen erheblichen Fortschritt. Fig. 66 illustriert

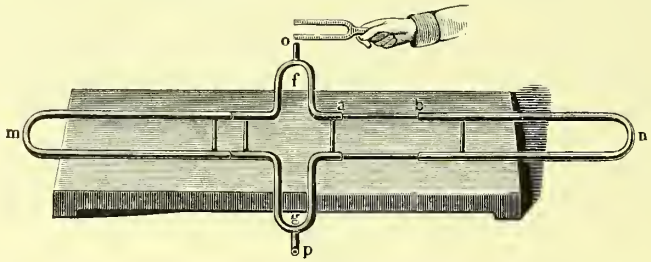


Fig. 66.

die jetzt meist in Laboratorien gebräuchliche Form derselben. Bei *o* tritt der Tonwellenzug ein, gabelt sich bei *f* nach den Zweigen *m* und *n* hin und verläßt nach der Wiedervereinigung und Interferenz bei *g* die Röhre durch die Öffnung *p*. Die Abbildung zeigt den Röhrenarm *m* ganz eingeschoben, den Arm *n* um die Strecke *ab* ausgezogen. Durch wechselnde Kombinationen der Armlängen kann man die Röhre rasch und bequem auf verschiedene Tonhöhen nacheinander einstellen.

Eine Modifikation der Koenigschen Interferenzröhre haben neuerdings Handke und Martens[2]) angegeben. Bei dieser sind die beiden Seitenzweige fest und dafür die Ansatzstelle des Hörschlauches variabel; sie befindet sich an einem T-Stück, das beweglich in den einander zugekehrten Mündungen der beiden U-Röhren angebracht ist (Fig. 67). Durch Verschieben desselben nach rechts oder links wird die erforderliche Ungleichheit der Zweiglängen hergestellt.

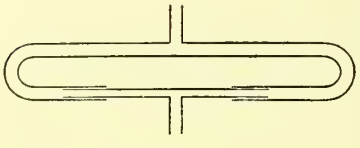


Fig. 67.

Wie schon eben angedeutet, ist die Auslöschung eines Tones durch eine Interferenzröhre faktisch selbst bei sorgfältigster Einstellung nie eine ganz vollkommene. Man pflegt dies darauf zurückzuführen, daß die Tonwellen in dem längeren Schenkel der Verzweigung einen größeren Energieverlust erleiden, und hat deshalb eine entsprechende Verengerung des kürzeren empfohlen. Besser ist es, mehrere Röhren hintereinander zu schalten und dieselben überdies unmittelbar mit dem Ohre des Beobachters zu verbinden, während der Ton aus einem entfernten Zimmer durch eine besondere Röhre zugeleitet wird. Denn befinden sich Schallquelle und Interferenzapparat in

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 146, S. 195, 1872.
2) Verhandlungen d. Deutschen Physikal. Gesellsch., 1907.

dem gleichen Raume, so kann gelegentlich von höheren und lauteren Tönen doch etwas, sozusagen mit Umgehung der Interferenzvorrichtung, in die zum Hörer führende Leitung dringen. Daß keine Tonwellen von der Schallquelle aus direkt in merklicher Stärke zum Ohre des Beobachters gelangen dürfen, versteht sich für feinere Versuche von selbst.

Aus diesen Gründen erscheint mir die in Fig. 68 abgebildete Vorrichtung besonders empfehlenswert. Sie ist meines Wissens zuerst im Tübinger Physiologischen Institut auf Anregung Grützners von E. Sauberschwarz[1]) angewendet worden, der sie übrigens ausdrücklich als eine Kombination Quinckescher Röhren von der Form unserer Fig. 65 c kennzeichnet. Das Hauptrohr AB, das bei B durch ein kurzes Stück Kautschukschlauch mit der durch die Wände W_1 und W_2 hindurch geführten Klangzuleitungsröhre

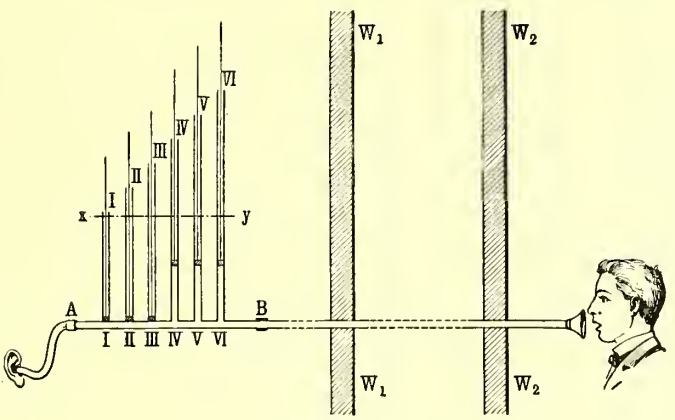


Fig. 68.

verbunden ist, hat eine Länge von 90 cm und eine Weite von 1 cm. Die Seitenröhren haben den gleichen Durchmesser, einen gegenseitigen Abstand von 10 cm und eine Länge von resp. 50, 60, 70, 80, 90, 100 cm. Die Führungsstangen der in den Seitenröhren verschiebbaren Stempel sind graduiert und zwar so, daß man die Länge des offenen Lumens unmittelbar in Zentimetern ablesen kann.

Bei dem von Herrn Mechaniker E. Zimmermann[2]) für das Physiologische Laboratorium der Berliner Charité-Ohrenklinik gebauten Interferenzapparate gehen von dem Hauptrohre 10 gleich lange Seitenrohre ab. Die ganze Länge des horizontalen Rohres beträgt 165 cm, die der vertikalen 120 cm bei einem durchgängigen Lumen von 19 mm. Die Seitenröhren sind an ihrem freien Ende (ungefähr entsprechend der Linie xy in Fig. 68) durch eine Metallschiene miteinander verbunden und auf diese Weise gegen Verbiegungen geschützt. Dabei ist der Apparat so eingerichtet, daß er sich in zwei Systeme mit je fünf Seitenröhren zerlegen läßt[3]).

1) Pflügers Archiv f. d. ges. Physiologie, Bd. 61, S. 1 ff., 1895.
2) Leipzig, Emilienstr. 21, u. Berlin N., Chausseestr. 6.
3) Preis 265 Mark.

Das Anbringen mehrerer Seitenröhren am Hauptrohr statt der einzigen des ursprünglichen Quinckeschen Modells ermöglicht es, verschiedene Teiltöne eines Klanges gleichzeitig zu vernichten. Zwei bis drei Seitenröhren genügen in der Regel für je einen Ton. Hierbei ist wohl zu beachten, daß der auf Auslöschung eines Tones von der Schwingungszahl n eingestellte Apparat schon an sich auch diejenigen Töne zum Verschwinden bringt, deren Schwingungszahl ein ungerades Multiplum von n ist, weil ein Umweg gleich einer halben Wellenlänge des Tones n auch für die Töne $3n$, $5n$ usw. eine Phasenverschiebung vom Betrage einer halben Wellenlänge zur Folge hat. Handelt es sich also bei einem Interferenzversuche etwa um einen von mehreren harmonischen Obertönen begleiteten Grundton n, so werden durch einige auf dessen Höhe eingestimmte Seitenröhren die Töne n, $3n$, $5n$ . . . beseitigt, wobei dann die Oktave, z. B. der Stimmgabeln, mit oft überraschender Stärke hervortritt. Sind außerdem zugleich etliche Röhren auf diese Oktave $2n$ eingestellt, so fallen auch die Töne $2n$, $6n$, $10n$ . . . aus, so daß schließlich in manchen derartigen Fällen überhaupt nicht viel mehr von dem Klange übrig bleibt als die ihn begleitenden Geräusche.

In der Regel wird der Interferenzapparat mit dem Ohre eines Beobachters verbunden. Man kann aber natürlich auch die Interferenzwirkung objektiv zur Anschauung bringen. Zu diesem Zwecke kombinierte Koenig das Ende p einer Röhre wie in Fig. 66 mit einer manometrischen Flamme: ohne Interferenz zeigt dieselbe im Drehspiegel die bekannten Zacken, bei der Interferenz erscheint sie als ungezähnter Streifen. Auch eine gewöhnliche, über die Öffnung p gespannte Membran ist als Index für die Interferenz oder Nicht-Interferenz verwendbar. Streut man Sand darauf oder versieht man sie mit einem Spiegelchen, das einen Lichtstrahl reflektiert, so bleiben Sand und Spiegel während der Interferenz in Ruhe.

Bei der für die Interferenzversuche erforderlichen Ermittelung der Halb- oder Viertelwellenlängen, welche zu den in Frage kommenden Tonhöhen gehören, werden dem Leser die als Anhang dem folgenden Kapitel beigefügten Tabellen der Tonwellenlängen und Schwingungszahlen von Nutzen sein. Betrifft beispielsweise der Versuch den Ton d^1 und beträgt die Temperatur 18° C., so findet man in Tabelle IV, dritte vertikale, fünfte horizontale Zahlenreihe, die ganze Wellenlänge von $d^1 = 1{,}179$ m; eine Reihe tiefer die halbe, eine Reihe darunter die Viertel-Wellenlänge. Ist statt der Buchstabenbezeichnung des Tones eine Schwingungszahl gegeben, etwa 870, so ergibt sich aus Tabelle VIII, daß es sich um das zweigestrichene a handelt, und aus Tabelle IV, daß dieser Tonhöhe eine Halbwellenlänge gleich 0,1968 m (bei 18° C.) entspricht. Läßt sich die gesuchte Halb- oder Viertelwellenlänge nicht unmittelbar aus einer der Tabellen entnehmen, so wird man doch durch Interpolieren beziehungsweise durch einiges Hinundherverschieben der zunächst nach der Tabelle ungefähr eingestellten Interferenzröhre leicht zum Ziele kommen. Will man indes die (ganze) Wellenlänge eines Tones durch Berechnung feststellen, so muß man mit der Schwingungszahl in den der herrschenden Temperatur t^0 entsprechenden Wert der Schallgeschwindigkeit $v = 331{,}8\sqrt{1 + 0{,}00367\,t}$ (Tabelle I) dividieren.

4. Schwingungszahlenbestimmung.

Die Aufgabe, eine Tonhöhe zu bestimmen, ist je nach den Umständen des gegebenen Falles verschieden schwer. Es kommt dabei auf die Art der Schallquelle, auf die Tonregion, in welcher die betreffende Schwingungszahl liegt, und auf den Grad der verlangten Genauigkeit an.

Genügen Feststellungen wie die, daß der fragliche Ton ein e^0, ein d^1 oder etwa ein tiefes fis^2 sei, so können einzelne Personen, die im Besitze des sogenannten absoluten Tonbewußtseins[1]) sind, die Höhe unmittelbar nach dem Gehör angeben, geradeso wie man eine dem Auge dargebotene Farbe als rot oder gelb oder blaugrau bezeichnet. Allerdings pflegt sich die Erkennbarkeit der absoluten Tonhöhe nur auf die in der Musik gebräuchlichen Töne zu erstrecken, und bei manchen ist sie auf bestimmte Instrumente oder wenige Oktaven, gelegentlich sogar auf einzelne Töne, worunter dann häufig der Kammerton, beschränkt. Auch muß hervorgehoben werden, daß Täuschungen bezüglich der Oktavenlage des sonst richtig benannten Tones vorkommen.

Wer nicht über ein absolutes Gehör verfügt, jedoch musikalisch im üblichen Sinne dieses Wortes ist, kann mit Hilfe seines Intervallsinnes die Notenbezeichnung eines Tones finden, indem er ihn mit einem anderen von bekannter Höhe, zum Beispiel mit einem Stimmpfeifchen oder einer Gabel, vergleicht. Wird etwa hierbei das direkte Urteil durch große Distanz der Schwingungszahlen erschwert, so läßt sich dieselbe dadurch überbrücken, daß man von dem einen Tone ausgehend zum anderen hin die Tonleiter singt oder pfeift. Freilich versagt auch diese Methode gegenüber den sehr hohen und den ganz tiefen Tönen.

Sehr einfach ist die Berechnung der Tonhöhe einer Lippenpfeife nach den bereits im Kapitel über Labialpfeifen und Gebläseeinrichtungen[2]) erörterten Formeln $N = \frac{v}{2l}$ bzw. $N = \frac{v}{4l}$. Dafür ist indessen auch das Resultat nur annähernd richtig, ganz abgesehen davon, daß der Einfluß des Anblasedruckes unberücksichtigt bleibt, und überdies sind die Formeln lediglich unter der Voraussetzung gültig, daß die Längendimension der Pfeife sehr groß ist im Verhältnis zum Querschnitt. Sie passen nicht für sogenannte kubische Pfeifen, d. h. solche, die genau oder ungefähr so breit wie hoch sind.

Für die Ermittelung der Schwingungszahl einer Saite ist die bekannte Taylorsche Formel anwendbar, soweit die Einschränkungen, denen ihre Genauigkeit unterworfen ist, dies gestatten[3]). Sind, wie es oft vorkommen wird, nicht alle in die Taylorsche Gleichung eingehenden Faktoren bekannt, so ist diese selbst nicht unmittelbar zu gebrauchen. Man wird in solchem Falle zunächst durch Vergleichung mit einer anderen Tonquelle, vielleicht einer Stimmgabel, die Tonhöhe n_1 eines bestimmten Teiles l_1 der Saitenlänge feststellen und dann die Schwingungszahl n_2 irgend einer anderen

1) Näheres hierüber bei O. Abraham, Das absolute Tonbewußtsein; Sammelbände d. Internat. Musikgesellsch., III, 1901/02.

2) S. oben S. 251.

3) Vgl. hierzu das auf Seite 249 Mitgeteilte.

Saitenlänge l_2 aus der Proportion $n_1 : n_2 = l_2 : l_1$, welche ja aus dem Taylorschen Gesetz folgt, errechnen können. Steht keine Hilfsgabel, Stimmpfeife oder dergleichen, dagegen noch eine zweite Saite zur Verfügung, so kann man sich der folgenden, auf Scheibler[1]) zurückzuführenden Methode bedienen. Gesucht sei die Schwingungszahl n der einen Saite A. Um sie zu finden, wird der bewegliche Steg der anderen Saite B von ihrem einen Ende aus, sagen wir vom linken, so weit nach rechts verschoben, bis eine Länge l_t erreicht ist, deren Ton um einige wenige Schwingungen, am besten ungefähr 4, tiefer ist als der Ton der Saite A, also die Schwingungszahl $n - x$ hat. Der Wert von x ist gleich der Anzahl der Schwebungen beider Töne, die durch Auszählen mit der Uhr zu bestimmen ist. Hierauf wird der Steg wieder nach links zurückversetzt und in ganz analoger Weise wie eben eine Länge l_h mit der Tonhöhe $n + y$ aufgesucht. Dann besteht die Proportion $l_t : l_h = n + y : n - x$, woraus sich $n = \frac{y l_h + x l_t}{l_t - l_h}$ ergibt. Daß auch eine Stimmgabel oder eine andere Tonquelle mit unbekannter Tonhöhe die Stelle der Saite A vertreten kann, versteht sich von selbst.

Um die Schwingungszahl einer Seebeckschen Sirene festzustellen, kann man entweder so verfahren, daß man die irgendwie gefundene Zahl der Scheibenumdrehungen pro Sekunde mit der Summe der Löcher des angeblasenen Kreises multipliziert, oder man vergleicht den Sirenenton mit dem einer anderen Tonquelle von bekannter Schwingungszahl. Für den Fall, daß er hierzu etwa zu hoch sein sollte, empfiehlt es sich, auf der Scheibe noch einen zweiten Kreis mit weniger Löchern anzubringen und zuerst dessen Tonhöhe zu bestimmen, aus der sich dann die gesuchte unter Berücksichtigung des Umstandes ergibt, daß die Schwingungszahlen beider Kreise sich verhalten wie die Löcherzahlen. Bei der Benutzung von Zahnradsirenen würde dementsprechend auf die Achse des Hauptrades neben dieses noch ein kleineres mit einer geringeren Zahl von Zähnen zu setzen sein.

Das Tourenzählwerk der Sirenen von Cagniard de La Tour, Dove und Helmholtz ist im streng wissenschaftlichen Sinne nur etwas wert, wenn oder solange die Umdrehungsgeschwindigkeit durchaus konstant ist. Bezüglich seiner Benutzung ist an der Hand der oben gegebenen Abbildung 47[2]) das Folgende zu sagen. Hinter dem in 100 gleiche Teile geteilten Zifferblatte zz befinden sich zwei Räder, von denen das eine 100, das andere 99 Zähne hat; das erstere führt den großen, das letztere den kleinen Zeiger. Wenn nun der Ton der Sirene eine konstante Höhe (sofern sie ihm nicht von vorneherein eigen) erreicht hat, wird das Zählwerk mittelst des Griffes h an die Schraube t herangeführt, so daß die Zähne der beiden Räder in dieselbe eingreifen. Alsdann wird bei jeder Umdrehung der Scheibe ss jedes der gezahnten Räder um einen Zahn fortgeschoben. Für je 100 Umdrehungen aber wird der kleine Zeiger um einen Teilstrich mehr hinter dem großen zurückbleiben, so daß man aus der Vermehrung des Abstandes beider Zeiger erfährt, wieviel hundert, und aus der Stellung des großen, wieviel einzelne Umdrehungen noch über diese hinaus in einer gegebenen Zeit ge-

1) S. d. Abhandlung von A. Röber, Poggendorffs Annalen, Bd. 32, S. 333, 1834.
2) Auf S. 275.

macht wurden. Diese Zeit selbst wird mit einem Metronom oder einer Stoppuhr gemessen, indem man das Zählwerk in einem genau markierten Moment einrücken und in einem späteren, ebenfalls markierten, wieder ausrücken läßt. — Natürlich muß das Zählwerk so leicht gehen, daß das Einsetzen desselben keinen merklichen Einfluß auf den Gang der Sirene ausübt.

Kommt es darauf an, die Schwingungszahl einer Lippenpfeife, Saite oder Sirene ganz exakt zu bestimmen und zugleich etwaige Schwankungen derselben während einer gewissen Zeit kontrollieren zu können, so liegt es am nächsten, den fraglichen Ton mit demjenigen einer Zunge oder einer Stimmgabel von möglichst präzise gemessener Höhe zu vergleichen. Denn diese beiden Instrumente sind bei richtiger Behandlung, wie wir wissen, hinsichtlich der Tonhöhe als ein für allemal konstant anzusehen. Wer viel mit Versuchen dieser Art beschäftigt ist, tut daher gut, sich in den Besitz der Appunnschen Tonmesser oder einer kontinuierlichen Reihe von Gabeln zu setzen. Die letzteren bieten gegenüber den Zungenkasten den Vorzug, daß ihre Töne leiser und weicher sind, dagegen ist der Bezold-Edelmannsehen Tonreihe der Nachteil eigen, daß ihre Gabeln keine fixe Tonhöhe haben. Das Ideal wäre eine Anzahl von Gabeln auf Resonanzkasten, deren jede von der nächsten um etwa 4 Schwingungen differierte, wie denn ja auch Scheibler wirklich eine solche Reihe hergestellt hat[1]). Indessen dürften die hohen Kosten der Anschaffung eines derartigen Sonometers zumeist hinderlich sein.

Die genaue Ermittelung einer unbekannten Schwingungszahl x mit Hilfe einer anderen von dem gegebenen Werte n kann auf verschiedene Arten geschehen. Will man das Gehör als entscheidende Instanz verwenden, so läßt man beide Töne zusammen erklingen und zählt, im Falle sie der Höhe nach wenig verschieden sind, die Schwebungen oder bestimmt bei größerer Differenz die Schwingungszahl des Differenztones erster Ordnung, indem man diesen seinerseits wieder mit einer unisonen Gabel oder noch besser mit einer schwebenden Hilfsgabel vergleicht. Die Anzahl der Schwebungen pro Sekunde beziehungsweise die Schwingungszahl des Differenztones ist dann gleich der Differenz zwischen n und x, woraus sich x sofort ergibt.

Für die Schwingungszahlenbestimmung durch Schwebungenzählung benutzt man am zweckmäßigsten eine sogenannte Stoppuhr oder Rennuhr (Fig. 69). Die beiden Zeiger, von denen der größere die Sekunden, der kleinere die Minuten angibt, werden durch einen Druck auf den Knopf der Uhr zusammen in Gang gesetzt, durch einen zweiten Druck werden sie arretiert und beim dritten springen sie auf den Nullpunkt zurück. Da die Sekundenspatien des Zifferblattes noch wieder in Fünftel geteilt sind,

1) Vgl. G. W. Muncke, Poggendorffs Annalen, Bd. 29, S. 381 ff., 1833. Sehr beachtenswert ist die in dieser Abhandlung enthaltene Bemerkung (S. 396 f.), eine um einige Grad erwärmte Gabel verliere wohl nach 30 bis 60 Minuten ihre Temperaturerhöhung soweit, daß sie thermoskopisch nicht mehr nachweisbar sei; die Veränderung der Tonhöhe persistiere aber in vermindertem Grade bis zum folgenden oder gar übernächsten Tage.

so lassen sich auch noch Zehntel-Sekunden bequem ablesen [1]). Das Verfahren bei der Zählung ist das folgende. Man übt sich zunächst durch Mittaktieren etwas auf den Rhythmus der Schwebungen ein, setzt dann bei einem bestimmten Taktschlag die Uhr in Gang und zählt die Schwebungen, beim Druck auf die Uhr mit Null beginnend: Null, eins, zwei, drei usw. bis 40 oder 50 oder 100, worauf man die Uhr genau mit dem letzten Schlag stoppt und die Zahl der Schwebungen durch die abgelesene Zeit dividiert. Je länger man zählt, um so weniger fällt der unvermeidliche kleine Fehler, den das nicht immer ganz präzise mit dem Schwebungsgipfel koinzidierende Ein- und Aussetzen der Uhr und die begrenzte Genauigkeit der Zeitbestimmung bedingt, ins Gewicht. Sind die Schwebungen (Tonstöße) nicht so langsam, daß sie sich leicht mit dem Ohre und der Taktbewegung einzeln verfolgen lassen, so teilt man sie in Gruppen ab, am besten zu je vier, und zählt diese, wie es das nachstehende Schema veranschaulicht, in welchem die Ziffern wie die Punkte die Schwebungsstöße und die vertikalen Striche die Momente für das Markieren der Gruppen bedeuten:

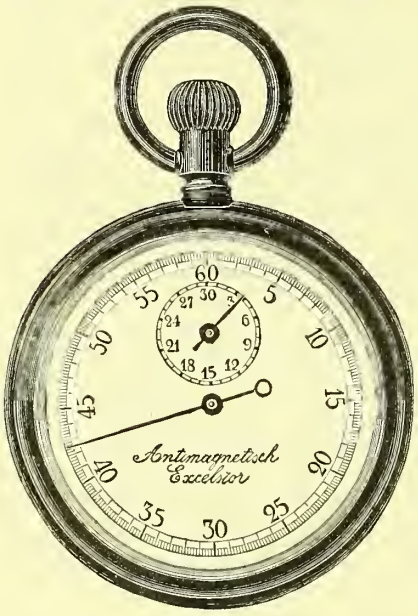


Fig. 69.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 ...

Null Eins Zwei Drei Vier Fünf Sechs ...

Je rascher die Schwebungen einander folgen, um so schwieriger gestaltet sich die Zählung, bis sie schließlich unmöglich wird. Bei einiger Übung gelingt es aber noch, selbst recht schnelle Stöße in Gruppen zu je 10 zusammenzufassen.

Ist der Unterschied zwischen der gegebenen Tonhöhe n und der gesuchten x nur ganz gering, so kann es gelegentlich passieren, daß man nicht weiß, welcher der höhere von den beiden Tönen ist, und ob also die Differenz zu n addiert oder davon subtrahiert werden muß. Alsdann klebe man, vorausgesetzt, daß wenigstens eine der Tonquellen eine Gabel ist, ein wenig Wachs an deren eine Zinke. Dadurch wird sie vertieft und folglich, wenn sie den höheren Ton repräsentiert, die Zahl der Schwebungen verringert, während im anderen Falle die Schnelligkeit der Stöße entsprechend zunimmt.

1) Es gibt auch Uhren dieser Art mit zwei Sekundenzeigern, die zunächst genau übereinander stehen und sich beim ersten Druck beide in Bewegung setzen. Auf den zweiten Druck bleibt der untere stehen, beim dritten auch der obere. Auf einen vierten Druck kehren alle Zeiger in die Nullstellung zurück.

Stehen n und x nahezu im Oktavenverhältnis, so geben beide Töne zusammen y Stöße pro Sekunde, die davon herrühren, daß der höhere Ton mit dem ersten Obertone, der Oktave, des tieferen schwebt. Ist x der höhere Ton, so schwebt es mit $2n$; es ist also $x = 2n \pm y$. Ist x der tiefere Ton, so schwebt $2x$ mit n, und es ist $2x = n \pm y$ oder $x = \frac{n \pm y}{2}$. Durch Auszählen dieser y Stöße, der „Oktavenschwebungen", ist daher bei gegebenem n auch der Wert von x leicht zu ermitteln. Zu dem gleichen Zweeke kann man die „Quintenschwebungen" benutzen, wenn n und x eine verstimmte Quinte miteinander bilden, wobei der erste und zweite Differenzton zusammen sehweben. Zwei Beispiele mögen zur Anleitung dienen. Es sei $n = 200$, $x = 300 + y$. Dann ist der erste Differenzton $D_1 = x - n = 300 + y - 200 = 100 + y$, der zweite $D_2 = 2n - x = 400 - 300 - y = 100 - y$; D_1 und D_2 geben $2y$ Schwebungen. In einem anderen Falle sei $n = 300$ und $x = 200 + y$. Nunmehr ist $D_1 = 300 - 200 - y = 100 - y$ und $D_2 = 2x - n = 400 + 2y - 300 = 100 + 2y$; D_1 und D_2 ergeben also $3y$ Schwebungen. Ist y gefunden, so folgt x aus der Proportion $n : x - y = 200 : 300$ beziehungsweise $n : x - y = 300 : 200$.

Die Benutzung eines Differenztones zur Bestimmung der Schwingungszahl setzt voraus, daß kein Zweifel darüber besteht, von welcher Ordnung er ist und in weleher Oktave er liegt. C. Stumpf und M. Meyer[1]) haben die „Differenztonmethode" besonders zur Eichung der Galtonpfeife verwertet. Sie stellten zunächst zwei Galtonpfeifen so ein, daß sie untereinander und mit einer Gabel von 4000 Schw. unison waren und notierten die Stellungen der beiden. Dann gingen sie mit der einen (ersten) soweit in die Höhe, bis ein bestimmter Differenzton erschien, der vollkommen deutlich zu hören war, eventuell aueh durch Gabeln aus der betreffenden Region, die mit ihm schwebten, kontrolliert wurde. Meist diente hierzu der Differenzton 500, oder aber 400, 600, 1000, 2000; bald war der eine, bald der andere zweckmäßiger. Man hörte bei der Verstimmung der ersten Pfeife anfangs das Klopfen, Rollen und Schwirren der Schwebungen, dann kam der Differenzton aus der Tiefe herauf und es ward bei der gewünschten Höhe haltgemacht. So war jede Täuschung über die Oktavenlage des Differenztones sowie darüber ausgeschlossen, daß er von erster Ordnung war, also gleich $h - t$ (wenn h die Schwingungszahl des höheren, t die des tieferen Primärtones bedeutet). Hierauf stimmten die Autoren die zweite Pfeife mit der nun höheren ersten durch kontinuierliches Heraufschrauben unison, notierten wieder die Einstellungen nebst zugehöriger Schwingungszahl und schritten in gleicher Weise Stufe für Stufe mit der Eichung fort, bis bei ca. 14000 Schw. die Differenztöne zu schwach wurden. In einigen, andere Pfeifen betreffenden Fällen benutzten Stumpf und Meyer auch Differenztöne höherer Ordnung, wie $2t - h$ oder $h - 2t$ oder $3t - h$, um die gesuchte Schwingungszahl h der Pfeife mit Hilfe einer tieferen Gabel von der gegebenen Tonhöhe t zu finden.

1) Wiedemanns Annalen d. Physik u. Chemie, Bd. 61, S. 760 ff., 1897. Vgl. hierzu ferner: C. Stumpf, Über die Bestimmung hoher Schwingungszahlen durch Differenztöne; ebenda, Bd. 68, S. 105 ff., 1899. — Über die Konstruktion von Serien höchster Stimmgabeln und deren Abstimmung mit Hilfe von Differenztönen hat R. König bemerkenswerte Mitteilungen gemacht in Wiedemanns Annalen, Bd. 69, S. 626 ff., 1899.

Wesentlich erleichtert wird die Wahrnehmung des Differenztones durch die Anwendung der empfindlichen Flamme nach Nikolaus Schmidt[1]). Zur Herstellung einer solchen bedient man sich einer etwa 20 cm langen und 1,5 cm weiten Glasröhre, deren eines Ende bis auf eine Öffnung von 0,5—1 mm Durchmesser zugeschmolzen wird. Mit Leuchtgas, das aus einem großen Gasbehälter unter dem Druck einer Wassersäule von 6—8 cm Höhe durch einen Kautschukschlauch und die Glasröhre ausströmt, erhält man dann eine schlanke, 40—60 cm lange, ruhig brennende Flamme. Sobald ein sehr hoher Ton einer Gabel, einer Meldeschen Stimmplatte oder der Galtonpfeife erklingt, verkürzt sich dieselbe um mehr als die Hälfte und nimmt die Form einer Gabel an, die sie behält, solange der Ton andauert. Wirken auf die Flamme zwei hohe Töne gleichzeitig ein, die Schwebungen geben, so geraten die Flammenflügel im Takte der Tonstöße in schwingende Bewegungen, und läßt man den Tonhöhenunterschied größer werden, beginnt die Famme einen lauten, je nach den Umständen auch von anderen Kombinationstönen begleiteten Differenzton auszusenden. Der bei den Versuchen von Stumpf und Meyer lediglich subjektive Differenzton wird also durch das Schmidtsche Verfahren geradezu objektiviert und zwar mit solcher Deutlichkeit, daß er sich bis über die Hörbarkeitsgrenze der Primärtöne verfolgen läßt. Die Schmidtsche Flamme, nach dem Stumpf-Meyerschen Prinzip verwendet, bietet mithin unter anderem ein sehr bequemes Mittel zur Eichung der Galtonpfeife, von dem ja auch bereits Edelmann, obwohl bisher in nicht einwandfreier Weise[2]), Gebrauch gemacht hat.

Ich wende mich nunmehr zu jenen Methoden, welche dazu dienen, eine unbekannte Schwingungszahl x durch Vergleich mit einer bekannten n ohne Mitwirkung des Ohres zu ermitteln, nämlich auf optischem statt auf akustischem Wege.

Speist man eine Koenigsche manometrische Flamme mit dem stark rußenden Azetylen an Stelle des Leuchtgases, so läßt sich ihr Auf- und Niederzucken beim Mitschwingen mit einem Tone in ganz einfacher Weise dadurch veranschaulichen, daß man in gleichmäßigem Zuge durch die Spitze einen Papierstreifen hindurchführt, auf welchem sich dann jede einzelne Oszillation in Form eines abgesetzten Rußringes markiert. Auf dieser Beobachtung basiert die Rußbildermethode von K. Marbe[3]), deren Instrumentarium[4]) in Fig. 70 dargestellt ist. In der Mitte sieht man den sehr massiven Papierabwicklungsapparat, der mittelst der Kurbel (rechts oben) durch Handbetrieb oder Motor und Schnurlauf in Bewegung gesetzt wird. Der Papierstreifen wird von einer großen Rolle hinten ab- und, über die vordere Walze hinweggehend, auf die obere wieder aufgewickelt. Unter der vorderen Walze stehen zwei Azetylenbrenner, die so angeordnet sind, daß ihre Flammenspitzen das Papier belecken und eine, diese Spitzen verbindend

1) Die empfindliche Flamme als Hilfsmittel zur Bestimmung der Schwingungszahl hoher Töne; Philos. Dissertation, München 1902.

2) S. oben S. 234.

3) S. hierzu die Abhandlungen von K. Marbe im 7. und 8. Jahrgang der Physikalischen Zeitschrift, 1906/07, und in der Zeitschrift für Psychologie usw., Bd. 49, S. 206 ff., 1908.

4) Zu beziehen von Herrn Mechaniker Fr. David Joos, Frankfurt a. M., Jordanstr. 17.

gedachte, Linie der Walzenachse parallel verläuft. Die beiden Brenner sind durch eine metallene Scheidewand voneinander getrennt, um eine gegenseitige Beeinflussung zu verhüten; außerdem können die Flammen durch

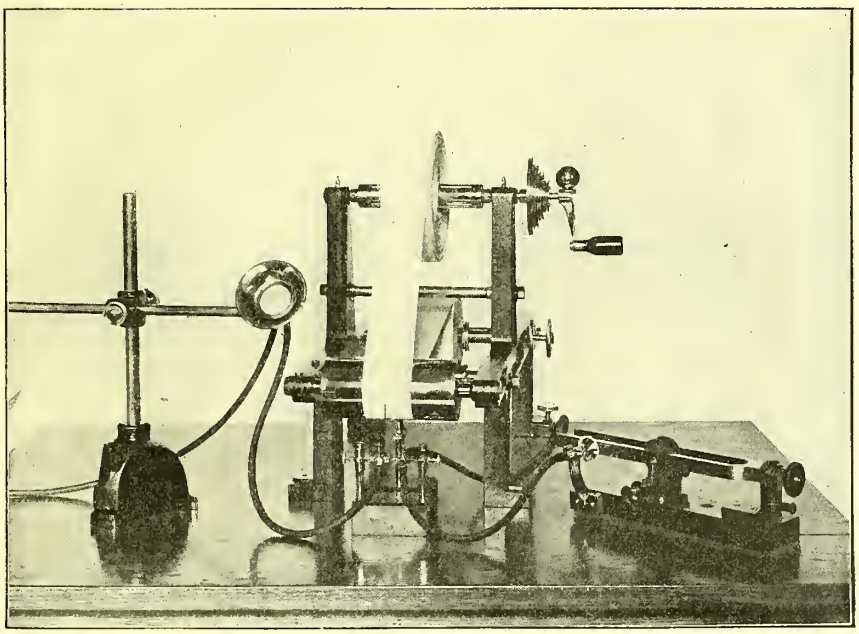


Fig. 70.

Glimmerzylinder gegen Luftströmungen geschützt werden. Rechts unten im Bilde ist eine elektrische Gabel aufgestellt und daneben ein mit einer Membran verschlossener Trichter, der den Ton vermittelst eines Schlauches

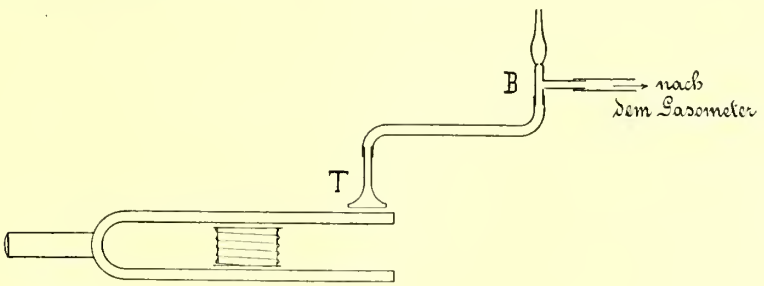


Fig. 71.

auf das Gas im Brenner überträgt. Der zweite Schlauch rechts führt zu dem (nicht mit abgebildeten) Azetylenentwickler. Der linke Brenner ist mit der am Stativ befestigten trichterförmigen manometrischen Kapsel verbunden, die zur Aufnahme eines zweiten Tones dient oder zum Hineinsingen beziehungsweise Hineinsprechen benutzt werden kann. Fig. 71 ist eine sche-

matische Wiedergabe der eben beschriebenen Verbindung zwischen Gabel, Trichter (T) und Brenner (B), Fig. 72 ein mit dieser Anordnung und einer Gabel von 100 Schw. gewonnenes Rußbild. — Auf die mannigfache Verwendbarkeit des Marbeschen Apparates in der Phonetik kann hier nicht näher eingegangen werden. Zum Zweck der Schwingungszahlenbestimmung läßt man einfach die beiden Töne n und x ihre Rußringstreifen nebeneinander aufzeichnen und zählt längs einer genügend großen Strecke, wie viel Ringe jeder derselben enthält. Das Verhältnis der gefundenen Summen ist zugleich das Verhältnis der Schwingungszahlen. Dieses Verfahren ist besonders da von Nutzen, wo es darauf ankommt festzustellen, nach welcher Richtung und in welchem Grade eine Tonhöhe sich etwa während einer gewissen Zeit verändert. Freilich wird es für Töne oberhalb c^2, wenigstens nach meinen Erfahrungen, mit zunehmender Höhe immer schwieriger, deutliche Rußbilder zu erhalten, doch gibt Marbe an, solche auch noch mit einer Gabel von 1000 Schw. bekommen zu haben, wenn er ihre Oszillationen unmittelbar durch die Luft auf die Flamme übertrug. Für solche Fälle wird empfohlen, die Gabel dicht an die Flamme heranzubringen und zwar so, daß die durch die Zinken gehende Ebene der Flammenachse parallel ist und die Achse der Gabel auf die Brennermündung weist.

Fig. 72.

Hat man die nötigen Vorrichtungen zur Verfügung, so kann man auch die Oszillationen der beiden — alsdann genau übereinander statt wie beim Marbeschen Verfahren nebeneinander anzubringenden — Azetylenflammen als Flammenzackenbilder photographisch fixieren. Die gesuchte Schwingungszahl ergibt sich durch Auszählen der Flammenspitzen in ganz derselben Weise wie bei dem eben besprochenen Auszählen der Rußringe. Als manometrische Kapseln lassen sich hierzu die gewöhnlichen Koenigschen verwenden.

Überhaupt sind in dieser Art für die Schwingungszahlenbestimmung alle diejenigen Methoden brauchbar, welche in der Phonetik zur Darstellung und Fixierung von Schallkurven benutzt werden. Sie sind lediglich dahin zu modifizieren, daß statt einer einzigen Klangkurve zwei einfache Tonwellenlinien (Sinuskurven) untereinander aufgezeichnet werden, von denen die eine durch den Ton von der bekannten Höhe n, die andere durch den Ton mit der gesuchten Schwingungszahl x erzeugt wird[1]). Prinzipiell wichtig ist dabei, daß die beiden Kurven recht dicht untereinander stehen, daß die Gipfelzahl längs der auszuzählenden Strecke genügend groß ist und daß die zwei Töne nicht allzu verschieden hoch sind, damit

1) So haben kürzlich auf meine Veranlassung die Herren Leppin und Masche (Berlin SO., Engelufer 17) mittelst Kombination zweier Martensscher Doppelspiegelmembranen sehr schöne Tonkurvenpaare photographisch hergestellt und mit dieser noch der weiteren Ausbildung harrenden Methode bereits Tonhöhenbestimmungen bis über 1000 Schw. hinaus vollführt. (Vgl. hierzu Bd. III, Abteilung 6 dieses Handbuches (Phonetik), S. 97 und Verhandlungen d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. 1911; Jena, G. Fischer 1911; S. 309 ff.) — Betreffs der Struyckenschen Methodik, höchste Schwingungszahlen photographisch zu bestimmen, siehe den Schluß dieses Kapitels.

nicht der eine Tonwellenzug eine im Verhältnis zum anderen übermäßig gestreckte Form erhält. Die Beachtung aller dieser Punkte dient dazu, die unvermeidlichen Koinzidenzfehler am Anfang und Ende der Strecke beim Auszählen möglichst zu verringern.

Eine meiner Meinung nach hinsichtlich ihrer Verwertbarkeit zur Schwingungszahlenbestimmung nicht genügend gewürdigte Beobachtung, die wir, wie so viel Hervorragendes in der Akustik, Rudolf Koenig[1]) verdanken, ist die folgende. Wenn man von zwei Tönen, die ganz genau im Oktavenverhältnis stehen, jeden für sich zu einer manometrischen Kapsel leitet, die beiden Kapseln aber in einen gemeinschaftlichen Brenner münden läßt, so hat die von den Tönen in Oszillationen versetzte Gasflamme im Drehspiegel „das direkte Aussehen, als befände sich in ihr unbeweglich noch eine kleinere. Bei der geringsten Verstimmung gerät diese aber in Zuckungen und verlängert und verkürzt sich periodisch in der größeren. Jede dieser aus Auf- und Absteigen zusammengesetzten Doppelbewegungen zeigt eine Schwebung an . . .“ Ähnliches fand Koenig bei Quinte, Quarte und Terz. Der völligen Reinheit des Intervalles entsprach absolute Ruhe des Flammenbildes, während jegliche Verstimmung sich durch eine wallende Bewegung in der Flamme dokumentierte. Ich selbst verfüge vorläufig nicht über eingehendere Erfahrungen bezüglich dieser Erscheinungen, zweifle aber nicht daran, daß man sie mit Nutzen als Kontrollmittel wird verwerten können, wenn es sich etwa darum handelt, eine Edelmannsche Laufgewichtgabel in ein reines Intervall zu irgendeiner anderen konstanten Tonquelle zu bringen. Trifft das zu, so würde dieses Verfahren, welches man als Flammenbilderkontrolle der Intervallreinheit bezeichnen könnte, dieselben Dienste leisten wie die bekannten Lissajousschen Figuren, deren Verwendung zur Feststellung von Schwingungszahlen zwar sehr genaue Resultate liefert, aber ebenso wie die stroboskopische Methode wegen der verhältnismäßig umständlichen Technik in der physiologischen Akustik wenig beliebt ist.

Wie schon hervorgehoben wurde, muß die zur exakten Ermittlung einer gesuchten Schwingungszahl x dienende bekannte Tonhöhe n selbst sehr genau gemessen und konstant sein, also als Tonquelle für n eine geeichte Tonmesserzunge gewählt werden oder eine ebensolche Gabel, die auf einem Resonanzkasten montiert ist, so daß sie nicht in die Hand genommen zu werden braucht. Als Grundlage für die Eichung von Gabeln und Tonmessern mit fester Tonhöhe benutzt man gern die im Handel[2]) zu beziehenden, von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Charlottenburg bei Berlin geprüften und beglaubigten Stimmgabeln mit dem Normalstimmton $a^1 = 435$ Doppelschwingungen. Es gibt zwei Arten dieser Gabeln. Die eine ist so abgestimmt, daß die Zahl der ganzen Schwingungen pro Sekunde bei 15° C. um nicht mehr als $\pm 0{,}5$ von 435 abweicht. Bei der anderen Art, den sogenannten Präzisionsgabeln, ist die Abstimmung eine solche, daß die Differenz von 435 bei 15° C. nicht mehr als $\pm 0{,}1$ beträgt. Die Beglaubigung

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 146, S. 167 f., 1872; Quelques expériences d'acoustique, Paris 1882, S. 53.

2) Z. B. von der Firma Warmbrunn, Quilitz u. Co., Berlin NW. 40, Heidestraße 55—57.

der Gabeln erfolgt durch Blauanlassen und vorschriftsmäßige Stempelung sowie durch Beigabe eines Beglaubigungsscheines. Die Richtigkeit der Tonhöhe wird nur solange gewährleistet, als sich an dem blauen Überzuge oder den weiß polierten und gestempelten Enden der Zinken keine Beschädigungen zeigen. Die Präzisionsgabeln sind durch das Aufbringen eines fünfstrahligen Sternes besonders gekennzeichnet. Sie werden meist mit einem Schallkasten abgegeben, von dem sie nicht entfernt werden dürfen. Während des Nichtgebrauches werden sie am zweckmäßigsten in einem eigenen Umschlußgehäuse aufbewahrt, nachdem sie mit einem reinen feinen Tuche (wenn nötig, unter Anwendung von Benzin, Spiritus oder Terpentin) von anhaftendem Kolophonium bzw. Fingerspuren gereinigt und alle Teile der Gabeloberfläche mit Vaselin eingefettet sind. Vor dem Gebrauch wird die Vaselinschicht mit einem reinen in Benzin getauchten Tuche wieder vollständig entfernt. Die Erregung geschieht durch Schlag mit einem gepolsterten Hammer oder Anstreichen mittelst Cellobogens, der am besten in einer Entfernung von einem Viertel der Zinkenlänge, vom freien Ende aus gerechnet, über beide Zinken geführt wird.

Die Eichung der Präzisionsgabeln seitens der Reichsanstalt wird in der Weise ausgeführt, daß man die zu prüfende Gabel mit einer Standardgabel von genau 433,5 oder mit einer zweiten Standardgabel von genau 436,5 Schwingungen schweben läßt und die Schwebungen mit der Uhr auszählt. Bei den anderen a^1-Gabeln, bei denen der Fehler bis $\pm 0{,}5$ betragen darf, verfährt man noch einfacher so, daß man die zu eichende Gabel erst mit der einen, dann mit der anderen der erwähnten Standardgabeln schweben läßt und den Schwebungsryhthmus in beiden Fällen mittelst des Gehörs vergleicht. Ist er beide Male genau derselbe, so liegt der Gabelton auch genau zwischen 433,5 und 436,5 in der Mitte, ist also gerade gleich 435. Im anderen Falle vermag man mit dem Ohre unmittelbar und hinreichend präzise zu beurteilen, ob die Abweichung von 435 mehr oder weniger als $\pm 0{,}5$ beträgt.

Die Reichsanstalt übernimmt auch die Prüfung und Justierung der Schwingungszahl beliebiger, ihr zu diesem Zwecke übergebener Stimmgabeln[1]). Da es sich hierbei meist um die Tonhöhen c^1, c^2, c^3 und ähnliche, in den physiologischen oder physikalischen Laboratorien übliche Normaltöne handelt, so hat die Anstalt eine Anzahl von Normalen zur Verfügung, die annähernd die Schwingungszahlen 256, 500, 512, 1024 usw. besitzen. Mit einer von diesen wird die zu prüfende Gabel, wenn ihre Tonhöhe in die Reihe paßt, durch Schwebungszählungen verglichen, wozu eventuell auch Oktavensehwebungen oder Quintenschwebungen herangezogen werden.

Wenn keine geeignete Vergleichsgabel vorhanden ist, wird die gesuchte Schwingungszahl von der Reichsanstalt direkt auf graphischem Wege nach Melde[2]) ermittelt. Die zu prüfende Gabel und eine andere von genau be-

1) Solche Gabeln sind zu beziehen aus den präzisionsmechanischen Werkstätten von Max Kohl in Chemnitz, von E. Zimmermann, Leipzig, Emilienstr. 21, von Hans Heele, Berlin O. 34, Zorndorferstr. 50 u. a.

2) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 51, S. 661, 1894. [S. hierzu auch die Abhandlung von A. Zickgraf über Meldes „Pendelvibrographen", Inaug.-Diss., Marburg 1899.]

kannter Tonhöhe werden so angeordnet, daß beide gleichzeitig ihre Schwingungskurve auf eine rasch vorbeigeführte, mit einem Gemisch von Ruß und Öl überzogene Glasplatte aufzeichnen, worauf die Schwingungszahlen durch Auszählen unterm Mikroskop festgestellt werden. Das seinerzeit von Leman [1]) eingehend beschriebene Verfahren, eine der zu prüfenden Gabel hinsichtlich der Tonhöhe nahe benachbarte Gabel ihre Schwingungszahl durch Kurvenschreibung auf einem Kymographion oder durch Betätigung eines phonischen Rades selbst registrieren zu lassen und die gezählten Schwebungen zwischen ihr und der zu prüfenden Gabel nach dem Telegraphenschriftprinzip zugleich mit den Zeitmarken auf einem laufenden Papierstreifen zu markieren, wird in der Regel nur für Standardgabeln angewendet.

Für den Fall, daß bei irgend einem akustischen Experimente für die Bestimmung einer Tonhöhe ein passender Vergleichston nicht zur Verfügung oder aus irgendwelchen Gründen nicht anwendbar ist, kommt die eine oder andere der Methoden zur unmittelbaren Schwingungszahlenbestimmung in Frage. Dieselben werden namentlich für höchste Töne und tiefe Stimmgabeln benutzt.

In dem letzteren Falle ist die graphische Methode am Platze. Sie besteht darin, daß man die Gabel ihre eigene Kurve auf eines der bekannten Kymographien aufzeichnen und dicht darunter von einem gut funktionierenden Chronographen Zeitmarken in passender Frequenz schreiben läßt, worauf zum Schluß durch einfaches Auszählen längs einer genügend großen Zeitstrecke die Zahl der auf die Zeiteinheit entfallenden Schwingungen ermittelt wird [2]). Das an der einen Zinke der Gabel zu befestigende Schreibhebelchen muß dabei gegenüber der Masse der Gabel so leicht sein, daß es nicht als vertiefende Belastung wirkt, was ja gerade bei den gewichtigen tiefen Gabeln ohne Schwierigkeiten zu erreichen ist. Die Geschwindigkeit des Kymographions sei so bemessen, daß die Wellengipfel scharf markiert, jedoch auch nicht allzu dicht zusammengedrängt sind. — Daß man an Stelle der Marken des Zeitschreibers eine zweite Tonkurve benutzen kann, haben wir an dem eben beschriebenen graphischen Verfahren der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt sowie bei dem Marbeschen gesehen; wie denn auch umgekehrt bei letzterem die Rußkurve des Tones von der bekannten Höhe n dadurch zu ersetzen ist, daß man in den Rußstreifen des zu prüfenden Tones von einem geeigneten Chronographen, z. B. dem Engelmannschen [3]), eine Zeitkurve einzeichnen läßt.

Den ganz hohen und höchsten Tönen gegenüber verfährt man mit Vorliebe so, daß man zunächst die Wellenlänge bestimmt, aus der sich dann durch Division in die Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Schwingungszahl ergibt. Zu diesem Zwecke leitet man den Ton in eine an ihrem einen Ende geschlossene Röhre, so daß sich stehende Wellen in der die Röhre erfüllenden Luft bilden, und markiert deren Knotenpunkte beziehungsweise Bauchmitten entweder optisch oder akustisch, womit die Wellenlänge

1) Zeitschr. f. Instrumentenkunde, 10. Jahrgang, März-Juni 1890.

2) Bezüglich der Kymo- und Chronographie vgl. hierzu Band I dieses Handbuches, Abteilg. 4, Allgemeine Methodik II.

3) Vgl. H. Gutzmann, Physiologie der Stimme u. Sprache; Braunschweig, Vieweg u. Sohn 1909, S. 49.

ohne weiteres gegeben ist, da bekanntlich je zwei aufeinander folgende Knoten und ebenso je zwei aufeinanderfolgende Bauchmitten eine halbe Welle begrenzen.

Grundlegende Versuche von A. Kundt[1]) haben gelehrt, daß, wenn die eben erwähnte Röhre mit einem äußerst leichten Pulver beschickt wird, die Partikelchen desselben sich unter der Toneinwirkung zu einer bestimmten Figur ordnen, an welcher man genügend scharf die Knoten und Bäuche erkennen und die Distanzen messen kann: Kundtsche Staubfiguren-Methode.

Kundt beschränkte seine Experimente auf verhältnismäßig tiefe Töne. Als Pulver fand er Semen Lycopodii am geeignetsten. Wenn er ein wenig

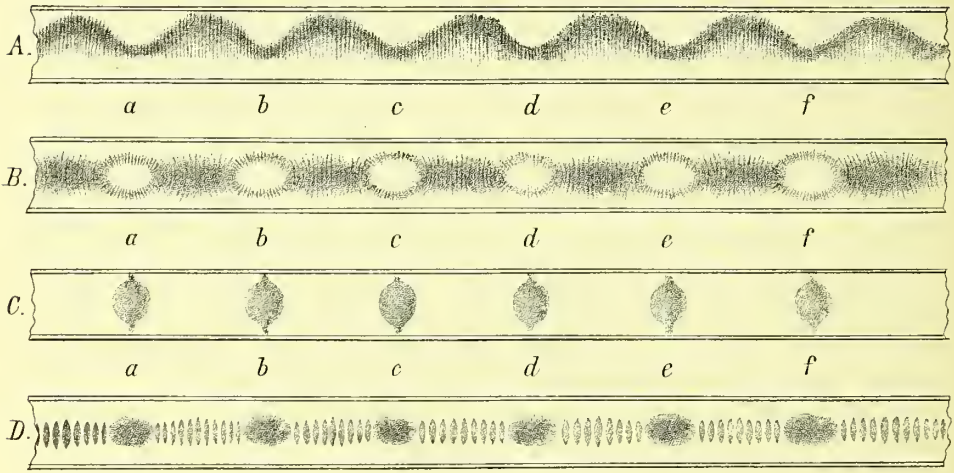


Fig. 73.

von dem Samen in eine gläserne Röhre gefüllt und durch Schütteln so verteilt hatte, daß es überall als Staub an den Wänden haftete, so wurde das Pulver bei der Tonerregung an den Stellen der Bäuche aufgewirbelt, während es an den Knotenstellen liegen blieb, und entwickelte sich auf diese Weise die eine oder andere Form der in Fig. 73 abgebildeten Staubfiguren. Die mit a bis f bezeichneten Stellen sind die Knoten, die Zwischenräume die Bäuche. Auffallend sind die Rippungen der letzteren und der Untersehied der Knoten in Fig. 73B und C, insofern die einen die Gestalt von Löchern zeigen, während die anderen solide Häufchen repräsentieren, zu denen aller Staub aus den Bäuchen hingewandert ist. Warum zuweilen diese, zuweilen jene Form der Staubfigur auftritt, ist weder von Kundt selbst noch von späteren Autoren in allen Punkten völlig aufgeklärt. Es ist anzunehmen, daß die Fig. 73C einer größeren Tonintensität entspricht als B und daß die Rippungen in einem gewissen Zusammenhang mit Obertönen stehen. Doch kommt es für uns ja auch nur auf die exakte Meßbarkeit der Halbwellenlänge an, deren Möglichkeit ohne weiteres aus der Fig. 73 hervorgeht. Kundt bestimmte bei seinen ersten Versuchsreihen stets

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 127, S. 497, 1866.

die Gesamtlänge einer ganzen Serie von Halbwellen und dividierte das Resultat durch die Anzahl derselben, wodurch die unvermeidlichen Fehler sich entsprechend verringern. Die Messung geschah mit einem Stangenzirkel, dessen Spitzendistanz dann jedesmal auf einem Maßstab abgelesen wurde. — Bemerkenswert ist noch, daß Kundt bei Versuchen mit körnigen Substanzen sowie mit dicken bzw. dunklen Dämpfen an Stelle des Lycopodiums im allgemeinen keine guten Resultate erhielt, daß aber nach Anfüllen der Röhre mit möglichst dichtem Salmiaknebel beim ersten Erklingen des Tones plötzlich aller Nebel verschwand, indem das Salmiak sich an den Knotenpunkten auf dem Boden der Röhre absetzte.

Auf Töne aus der Gegend der oberen menschlichen Hörgrenze und jenseits derselben ist das Kundtsche Verfahren zuerst von Rudolf Koenig angewendet worden, der seine Erfahrungen hierüber in einer besonderen Abhandlung[1]) niedergelegt hat. Als Schallquellen benutzte er Stimmgabeln, zu deren Tonhöhenbestimmung eben die Staubfiguren dienen sollten. Was die Weite der Röhren betrifft, so fand er, daß für den Ton c^5 die Kundtsche Regel, nach welcher der Durchmesser zum wenigsten gleich der Viertelwelle des Tones sein muß, noch durchaus zutrifft; für c^6 war die passendste Röhrenweite ungefähr gleich der Halbwelle; für alle Töne über c^6 bis zu den höchsten hin wuchs das Optimum des Querschnittes von der Hälfte bis zu etwa zwei Dritteln der Wellenlänge und betrug also für c^7 11 mm, für c^8 5,5 mm, für c^9 3 mm. Hinsichtlich der Röhrenlänge ergab sich, daß der Ton c^5 in einer Röhre von 23 mm Durchmesser über 80 aufeinanderfolgende Halbwellen mit tadelloser Deutlichkeit hervorzurufen vermag und c^6 in einer Röhre von 20 mm Durchmesser ebenso wie c^7 in einer Röhre von 11 mm Weite etwa 90 bis 100 gut ausgebildete Halbwellen erzeugt. Bei einer solchen Anzahl wird, wenn man die Gesamtlänge mißt, der Fehler der Einstellung eines korrespondierenden Anfangs- und Endpunktes sehr gering. Für Töne über c^7 verwendete Koenig nur Röhren, die nicht mehr als 30 Halbwellen des betreffenden Tones enthalten konnten, von denen dann immer zirka 20 aufeinanderfolgende zur Messung brauchbar und genügend waren. Das gute Gelingen der Staubfiguren erwies sich auch als nicht unabhängig von der Art des Staubes. Besonders geeignet zeigte sich Korkfeilicht, namentlich wenn eine um so geringere Körnergröße gewählt wurde, je höher der Ton war. Koenig benutzte vier Siebe zur Sortierung, welche bzw. 277, 670, 1660 und 3080 Löcher pro Quadratzentimeter enthielten. Die ersten beiden dienten für die Töne c^5 bis c^7, die anderen für die noch höheren Schwingungszahlen. — Wenn der Staub in der Röhre gleichmäßig verteilt ist und auf dem Boden derselben eine Linie bildet, so empfiehlt Koenig, die Röhre um ihre Achse zu drehen, um dieser Linie eine höhere Lage auf der Seitenwand zu geben; es entwickeln sich dann sehr oft noch die Wellenfiguren ganz vortrefflich selbst in Fällen, in denen die am Boden befindliche Staublinie sich gar nicht mehr rühren will. Bei den ganz hohen Tönen hat Koenig häufig noch mit Erfolg gegenüber anfänglichem Versagen der Figurenbildung den Kunstgriff angewendet, dem Gestell, auf welchem die Röhre befestigt war, einen kleinen Schlag zu geben und damit das Pulver zu lockern.

1) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 69, S. 626 ff. und 721 ff., 1899.

Die Töne der Galtonpfeife hat zuerst A. Schwendt unter Anleitung von R. Koenig mittelst der Staubfiguren bestimmt[1]), welche Edelmann bekanntlich seitdem bis in die neueste Zeit zur Eichung seiner „Grenzpfeifen" verwendete. Daß dabei die Benutzung des Gummiballons zu fundamentalen Fehlern führt, ist bereits gebührend betont worden. Dagegen leisten die Staubfiguren nach wie vor treffliche Dienste zur Ermittelung der Schwingungszahlen von Galtontönen, wenn man die Pfeife mit konstantem Druck anbläst. Nur besteht dabei der Übelstand, daß — wie F. A. Schulze[2]) hervorhebt und ich bestätigen kann — bei einem Druck von weniger als 40 cm Wasser die Erzeugung von Staubfiguren nicht zu gelingen pflegt. Das Edelmannsche Gummigebläse älterer Form (ohne Diaphragma) war mit seinem Druck von über 60 cm in dieser Beziehung günstig. Aus Edelmanns reichem Erfahrungsschatze über die Staubfigurentechnik sei hier nach seinem „Leitfaden der Akustik für Ohrenärzte"[3]) das Folgende mitgeteilt. „Man trägt in eine Glasröhre, welche an einem Ende mit Kork oder (bei engen Röhrchen) mit Klebwachs verschlossen, wohl gereinigt und sorgfältig ausgetrocknet ist, trockenes Lycopodium ein, und zwar kein größeres Quantum, als zum Gelingen des Versuches eben unbedingt nötig ist. Hierauf wird das Pulver am verschlossenen Ende durch Vertikalhalten der Röhre (und Klopfen) angehäuft. Jetzt hält man die Röhre mit dem offenen Ende schief nach abwärts, wie wenn man das Pulver ausgießen wollte. Es wird nach geringer Übung und hauptsächlich dann, wenn alles recht trocken ist, sehr leicht gelingen, das Pulver in Form eines langen Streifens im Rohr zu verteilen. Bei sehr hohen Tönen empfiehlt es sich, das gröbere Pulver aus der Röhre fallen zu lassen und nur das allerfeinste, das an der Röhrenwand hängen bleibt, zu verwenden. Durch Klopfen mit einem Holzstäbchen an der Röhre kann man das gleichmäßige Zurechtlegen des Pulvers noch unterstützen. Zuletzt muß man aber einen schwachen Schlag in der Richtung der Röhrenachse machen, damit das Pulver sich lockert. Nun spannt man das Röhrchen in ein passendes Gestell horizontal ein und verdreht das Rohr so, daß der Staubstreifen nicht ganz unten, sondern etwas erhöht seitwärts liegt; das Pulver wird dann bei der leisesten Erschütterung an der Wandung der Röhre herabgleiten können. Bläst man das Grenzpfeifchen in solcher Lage an, daß sich das Maul der Pfeife direkt und mitten vor dem offenen Ende des Resonanzröhrchens befindet, so kommt die eingeschlossene Luftsäule zum Mitschwingen: natürlich im Tone der Pfeife. Da, wo die Luftbewegungen am stärksten sind, fällt der Staub am weitesten herab — umgekehrt da, wo Schwingungsknoten sind, bleibt er oben liegen. Es bilden sich Wellenbäuche in Form herabhängender Fäden oder Festons, und die Enden der Fäden bilden eine Wellenlinie, auf der man mit Leichtigkeit die Abstände der gleichen Phasen messen kann ... Wie schon erwähnt, ist es unbedingt notwendig, daß sowohl die Röhren als das Lycopodium ganz rein und trocken seien[4]); das Pulver soll in der Röhre beim Neigen derselben leicht hin und her

1) Verhandlg. d. Naturf. Gesellsch. Basel, Bd. 12, Heft 2; Sitzung v. 8. II. 1899.
2) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 68, S. 869ff., 1899.
3) Berlin, S. Karger, 1911, S. 51ff.
4) Das Lycopodium wird am besten unter der Luftpumpe über Schwefelsäure getrocknet.

laufen, fast wie eine Flüssigkeit. Die Röhren werden zu diesem Zweeke zuerst mit rauehender Salpetersäure, dann mit destilliertem Wasser, endlieh mit Alkohol ausgewasehen und im warmen Luftstrom getroeknet. Aueh ist anzuraten, Röhren und Pulver stets in einem gutsehließenden Gefäß aufzubewahren, in welehes man irgendein Troeknungsmittel, z. B. gebrannten Kalk, Phosphorsäure, Chlorcaleium oder dergleichen gibt. Man bedient sich zum Hervorbringen guter Staubfiguren einer Auswahl von Röhren, die zwischen einer Länge von 300 mm mit einem Lumen von 8 mm bis zur Länge von 20 mm und 1,5 mm lichter Weite variieren. Sehr hohe Töne erzeugen klare Figuren nur in sehr engen, kurzen und dünnwandigen Röhrehen. Zum bequemen Einspannen der Röhrehen kann man die in Fig. 74 abgebildete Klemme verwenden. Die Kundtsehe Röhre wird zwischen zwei Korkstöpseln *a* und *b* festgehalten, die vermittelst der Schraube *d* (dureh Entlanggleiten von *c* an *f*) einander genähert werden. Mit der Zwinge bei *e* wird das Ganze an eine Tischplatte geklemmt. Sehr enge kurze Resonanzröhrehen klebt man jedoeh am besten auf das obere Ende einer etwa 10 em langen Klebwaehsstange; deren unteres Ende wird naeh dem Zurechtklopfen des Staubstreifens an die Tisehkante gedrückt. Das Röhrchen wird bequemerweise während der Versuche nieht vom Klebwaehs abgenommen, sondern letzteres samt der Röhre immer vom Tisch abgelöst, wenn der Staubstreifen neu geordnet werden soll. Die Klebwachsstange bildet sodann einen bequemen Handgriff zum Manipulieren mit dem Röhrehen."

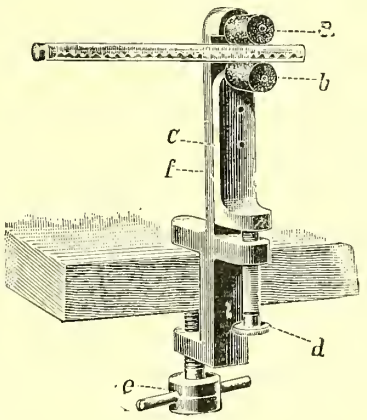


Fig. 74.

Die Bereehnung der Sehwingungszahl eines Tones aus der mittelst der Kundtsehen Röhre gefundenen Wellenlänge leidet unter dem erhebliehen Übelstande, daß die Fortpflanzungsgesehwindigkeit des Schalles in engen Röhren eine etwas andere ist als diejenige in freier Luft. Sie nimmt nämlieh für einen und denselben Ton mit dem Durehmesser der Röhre ab, während in einer und derselben Röhre die Verringerung größer ist für tiefere als für höhere Töne. So hat beispielsweise Kundt[1]) selbst, der übrigens angibt, daß die Abnahme der Sehallgesehwindigkeit erst in Röhren mit weniger als 26 mm liehter Weite merklich werde, für einen Ton von 90 mm Halbwelle in einer Röhre von 6,5 mm den Wert 323 m statt 332,8 m erhalten und in der gleiehen Röhre für einen dreimal so hohen Ton 328,14 m. Der Verlust an Sehallgeschwindigkeit ist naeh G. Kirehhoff[2]) auszudrüeken durch die Formel $v = V\left(1 - \frac{\gamma}{d\sqrt{\pi n}}\right)$, worin V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in freier Luft, n die Tonhöhe, d den Röhrendurehmesser und γ eine Konstante bedeutet, die von der inneren Reibung und der Wärmeleitung der Luft ab-

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 135, S. 337 ff. u. 527 ff., 1868.
2) Ebenda, Bd. 134, S. 177, 1868.

hängt und nach den besten vorliegenden Daten gleich 0,00742 [1]) zu setzen ist. Indessen hat es wenig Zweck, von dieser Formel für die Bestimmung höchster Schwingungszahlen auf Grund von Wellenlängen-Messungen in engen Röhren Gebrauch zu machen. Denn die Diskussion derselben seitens verschiedener Autoren läßt ihre praktische Genauigkeit in recht zweifelhaftem Lichte erscheinen. Dazu kommt, daß erwiesenermaßen auch die Beschaffenheit, Glätte oder Rauhigkeit, der Röhrenwand und die Menge des Staubes in der Röhre einen Einfluß auf die Schallgeschwindigkeit hat. Es ist ein naheliegender Gedanke, in einer und derselben Röhre zuerst die Wellenfigur eines Tones von bekannter Höhe, sodann diejenige des gesuchten Tones darzustellen und hiernach lediglich aus dem Verhältnis der Wellenlängen, also mit Elimination der Schallgeschwindigkeit, die fragliche Schwingungszahl zu ermitteln. Allein man würde auch auf diese Weise nicht zum Ziele kommen, da ja, wie wir sahen, die Schallgeschwindigkeit nicht nur von der Röhre, sondern auch von der Tonhöhe abhängt (während, beiläufig bemerkt, die Intensität keine Einwirkung auf dieselbe zu haben scheint). So pflegt denn der physiologische Akustiker sich damit zu begnügen, daß er mit der in der Röhre gefundenen Wellenlänge einfach in die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles für freie Luft bei der betreffenden Temperatur dividiert, und den gewissen Fehler, der ohnehin mit wachsender Tonhöhe offenbar an Größe und praktischer Bedeutung verliert, mit in den Kauf zu nehmen. Ebenso verzichtet er im allgemeinen auf die von Kundt [2]) in seiner späteren Arbeit empfohlene Fein-Methode der Halbwellenmessung und beschränkt sich auf den einfacheren Modus, die Länge einer möglichst großen Reihe von aufeinanderfolgenden Halbwellen so exakt als tunlich festzustellen und durch die Anzahl derselben zu dividieren.

Das zuletzt Gesagte gilt ebenso für die akustische Bestimmung der Wellenlänge höchster Töne in engen Röhren. Von diesem Mittel hat meines Wissens als erster F. A. Schulze [3]) Gebrauch gemacht, und zwar mit Hilfe eines Koenigschen Interferenzapparates [4]). Die Röhren desselben waren aus Messing und hatten eine lichte Weite von 12,3 mm. Die Weglänge betrug für jeden Zweig ca. 80 cm; durch Hervorziehen der übergeschobenen Röhre ließ sich der eine Zweig um etwa 70 cm verlängern. Wurde die eine Öffnung des Röhrensystems mit dem Ohre verbunden und der anderen aus einem entfernten Zimmer ein sehr hoher Ton durch einen Schlauch zugeleitet, so ließen sich die Maxima und Minima des Tones beim Ausziehen der einen Rohrhälfte deutlich und in hinreichend großer Zahl ermitteln. In einer zweiten Versuchsreihe wurde auf die Ausgangsröhre des Apparates ein durchbohrter Kork gesteckt und dessen Öffnung durch ein aufgeklebtes Glimmerplättchen verschlossen. War letzteres mit Sand bestreut, so kam dieser bei Einstellung eines Intensitätsmaximums des zugeführten Tones in lebhafte Bewegung, während er bei einem Intensitätsminimum vollkommen in Ruhe blieb, um aber bei der geringsten Verschiebung

1) Vgl. Auerbach, Artikel „Akustik“ in Winkelmanns Handbuch der Physik, Bd. II, S. 508, 1909.

2) Poggendorffs Annalen, Bd. 135, S. 355 ff., 1868.

3) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 68, S. 99 ff. u. 869 ff., 1899.

4) Vgl. oben Figur 66.

wieder in Vibration zu geraten, so daß die Einstellung oft auf Bruchteile eines Millimeters genau vorgenommen werden konnte. Diese „objektive" Methode bewährte sich auch bei Tönen jenseits der menschlichen Hörgrenze.

Gleichwie die Schulzeschen Interferenzversuche in letzter Linie auf Quincke zurückgehen, so ist auch der in Fig. 75 abgebildete Apparat von A. Seebeck[1]) zum Zweeke der Sehwingungszahlenbestimmung auf Anregung Quinckes konstruiert und benutzt worden. Wird in die Öffnung A der Röhre AB ein Ton hineingeleitet und der Stempel s so eingestellt, daß die Streeke BC gleieh $(2n-1)\frac{\lambda}{4}$ ist, so wird das Ohr, welches mit der bei C abgezweigten Röhre CD durch einen Gummischlaueh verbunden ist, ein Minimnm der Tonstärke empfinden. Denn in diesem Falle liegt bei C ein Wellenbaueh, d. h. es findet hier ein Maximum der Bewegung, aber ein Minimum der Dichtigkeitsschwankungen statt, während das Trommelfell zu seiner Erregung Druckänderungen braucht. Auf Grund dieser Überlegung

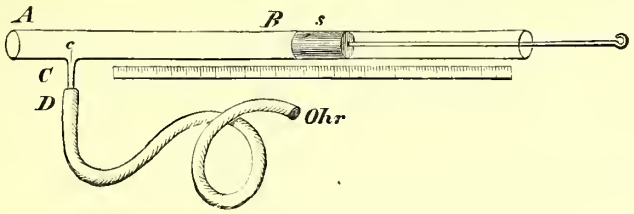


Fig. 75.

bestimmte Seebeck für verschiedene Töne, meist aus der eingestrichenen Oktave, die Viertelwellenlänge Bc (wobei c die Mitte der 4—5 mm weiten inneren Mündung von CD bedeutet) durch Ablesung an der Millimeterskala.

J. Hegener[2]) hat das Verdienst, dieses Verfahren auch auf die Töne der Galtonpfeife anwendbar gemacht zu haben. Die günstigsten Dimensionen seiner „Seebeckröhre" sind: Ganze Länge des Hauptrohres 22 bis 30 em, Durchmesser 8 mm; Länge der Strecke AC 5,5 cm; Länge des Seitenrohres CD 3 bis 4 cm, lichte Weite 3 mm. Der Stempel soll ein an einer dünnen Metallstange befestigter, mindestens 4 cm langer Kolben aus Holz oder Metall sein, der nicht luftdicht zu schließen braucht und leicht, ohne Reibung, in der Röhre laufen muß. Als Skala benutzt man am besten eine solche aus Papier, die unten auf die Glasröhre geklebt wird, so daß man, durch das Glas hindurch an der geraden Vorderfläche des Kolbens vorbeivisierend, die Stellung der letzteren parallaxenfrei ablesen kann. Den Nullpunkt der Millimeterskala verlegt Hegener an die Stelle c der Fig 75[3]).

Ist der Röhrenast CD mit dem Ohre verbunden, so kann man bei der Kürze der Wellen höchster Töne sehr bequem eine ganze Reihe Intensitätsmaxima oder -minima hintereinander einstellen, von denen, wie immer, je

1) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 139, S. 104 ff., 1870.

2) Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. des Ohres usw., Bd. 1, S. 321 ff., 1908.

3) Derartige „Seebeckröhrchen" sind durch Vermittlung des Physiologischen Laboratoriums der Ohrenklinik der Königl. Charité zu Berlin erhältlich zum ungefähren Preise von 1 Mark.

zwei aufeinanderfolgende eine halbe Welle begrenzen. Man hat also hier im Prinzip dieselben Verhältnisse, welche die Kundtsche Röhre bietet, dieser gegenüber aber den Vorteil, daß der Einfluß des Staubes auf die Schallgeschwindigkeit wegfällt, und daß die Markierung der Halbwellen auch bei geringeren Intensitätsgraden des Tones, auf die die Staubpartikelchen nicht reagieren würden, möglich ist.

An der Hörgrenze versagt selbstverständlich dieses, ganz auf die Perzeptionsfähigkeit des Ohres gegründete und darum, wenn man so will, als ein „akustisch-subjektives" zu bezeichnende Verfahren. Auch ist es bei längerem Arbeiten mit lauten höchsten Tönen ziemlich angreifend. Hegener hat sich daher, und zwar mit bestem Erfolge bemüht, ihm, ähnlich wie F. A. Schulze, ein „objektives" an die Seite zu stellen. Er verwendete dazu das Seebeckröhrchen in Verbindung mit einer empfindlichen Flamme. Die Anordnung ist die folgende. Ein Wasserkissen wird mit Leuchtgas aus der Hausleitung gefüllt und bis zu einem Druck von mindestens 30 cm Wasser mit Gewichten oder schweren Gegenständen belastet, der Auslaßhahn des Kissens durch einen weiten, langen Schlauch mit einem gewöhnlichen Einloch-Specksteinbrenner verbunden und dieser so vor der Mündung D des Seebeckröhrchens aufgestellt, daß der aus D austretende Ton den untersten Teil der Flamme trifft. Ist die Flamme genügend empfindlich — ihre Höhe wird durch einen Schraubquetschhahn reguliert, der mindestens 1 m vom Brenner entfernt am Zuführungsschlauch angebracht sei — so zuckt sie beim Entlangziehen des Kolbens in der Röhre im Tempo der Aufeinanderfolge der Halbwellen auf und nieder. Je zwei gleiche Phasen der Flammenbewegung markieren die Grenzpunkte einer Halbwelle. Da man damit rechnen muß, daß im Laufe längerer Versuche die Öffnung D des Seitenröhrchens durch die unmittelbar davor brennende Flamme zugeschmolzen wird, ist es nützlich, dem Seitenröhrchen mittelst eines kurzen Schlauchstückes noch ein kleines, ebenso weites Röhrchen vorzuschalten, das von Zeit zu Zeit ausgewechselt werden kann. Die Methode erfordert Geduld und etwas Übung, ist aber, wenn alles glückt, sehr bequem und elegant[1]).

In Anbetracht der Modifikationen, welche die Schallgeschwindigkeit in engen Röhren durch deren Beschaffenheit erleidet, ist es besonders anzuerkennen, daß F. A. Schulze[2]) ein ganz einfaches Mittel gefunden hat, die Halbwellen höchster Töne in freier Luft zu messen. Befindet sich die Schallquelle, etwa eine Galtonpfeife, einige Zentimeter über einer ebenen Tischplatte, so wird der Ton von letzterer reflektiert, und es entwickeln sich zwischen Pfeife und Platte stehende Wellen. Zur Erkennung der Knoten und Bäuche dient ein kreisrundes, ca. 0,1 mm dickes, auf einen schmalen Korkring von ungefähr 1 cm Durchmesser geklebtes Glimmerblättchen, das

1) An Stelle des immerhin umständlichen Hantierens mit dem Gassack dürfte es sich empfehlen, die Starkdruckflamme mittelst eines gewöhnlichen Wasserstrahlgebläses (vgl. Fig. 32 auf S. 262) zu erzeugen, indem man einfach dessen Saugrohr mit dem Gashahn und das Druckrohr mit dem Brenner durch je einen Gummischlauch verbindet. Bei anderer Gelegenheit wenigstens habe ich auf diese Weise tadellose „empfindliche" Flammen erhalten.

2) Sitzungsber. d. Ges z. Beförderung d. ges. Naturwissensch. zu Marburg, Nr. 5, Juni 1902 und Annalen d. Physik, 4. F., Bd. 24, S. 785, 1907.

mit Sand bestreut und in senkrechter Linie zwischen Tonquelle und Tisch auf und ab geführt wird. In den Bäuchen wirbelt der Sand auf, an den Knotenstellen bleibt er in Ruhe. Um die Schwingungen ungestört verlaufen zu lassen, wird das Glimmerblättchen nicht mit der Hand angefaßt, sondern an einem längeren dünnen, in den Kork gesteckten Stiele bewegt. Je nachdem der Ton stark oder schwach ist, stellt man am besten auf das Minimum oder auf das Maximum der Erregung ein. Die Messungen erfolgen zweckmäßiger in der Nähe der Platte als in der der Tonquelle. Auf diese Weise kann man nach Schulze Schwingungszahlen bis zu 30000 messen, und zwar bis auf weniger als 1 % genau. Ich halte dieses Verfahren für entschieden empfehlenswerter als etwa das Aufsuchen der Knoten zwischen Schallquelle und reflektierender Fläche mittelst der empfindlichen Flamme nach Rayleigh, welches nicht nur umständlicher ist, sondern auch bezüglich der Genauigkeit gewisse Nachteile aufzuweisen hat[1]).

Gänzlich unabhängig von der Schallgeschwindigkeit in der Luft ist die Meldesche „Rezonanzmethode“[2]). Sie kommt in Betracht bei der Schwingungszahlenbestimmung von sehr hohen Gabeln und von Stimmplatten, deren Töne einerseits so schwach zu sein pflegen, daß die Kundtschen Staubfiguren nicht leicht darauf reagieren, und andererseits so kurz, daß auch die eben geschilderten Methoden von Schulze und Hegener nicht gut anwendbar sind. Das Meldesche Instrumentarium veranschaulicht Fig. 76. *L* stellt einen Sandstein von 30 cm Länge, 11 cm Breite und 16 cm Höhe vor, in welchen eine starke Eisenklemme *k* eingegipst ist, die den Stab *ss* infolge besonderer Konstruktion unter überall ganz gleichmäßigem Druck und mit exakter Begrenzung der Länge festhält. Der Sandstein liegt auf einer soliden Unterlage *B*, auf der er in der Richtung des Stabes *ss* verschoben sowie gegen die Gabel gehoben oder gesenkt werden kann. Letztere (die eben auf ihre Tonhöhe untersucht werden soll) ist in den starken Holzklotz *K* eingeschraubt, der seinerseits auf einer höher stehenden Tischplatte befestigt wird. Die Gabel wird in der Richtung des Pfeiles mit einem Violinbogen angestrichen oder (oberhalb c^6) nach der Methode von Antolik[3]) erregt. Die Übertragung der Gabelschwingungen auf den Stab geschieht am besten durch ein auf dessen Ende gekittetes, nach oben keilförmig zugeschnittenes Korkstückchen, dem die Gabel lose anliegt. Als Material für die Stäbe fand Melde hartgewalztes Messing, englischen Gußstahl und Eisen geeignet; die Dimensionen waren: Dicke 1,5 bzw. 2 mm, Länge 320 mm, Breite 10 mm. Der Verlauf des eigentlichen Versuches ist der folgende. Nachdem ein vermutlich passender Teil des Stabes als schwingendes Stück

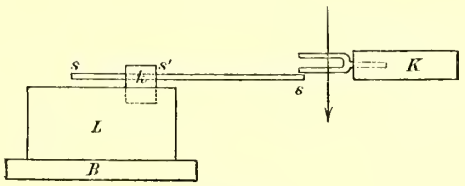


Fig. 76.

1) Vgl. hierzu die kritischen Bemerkungen von F. A. Schulze und J. Hegener, Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. usw. des Ohres usw., Bd. 1, S. 138 u. 328, 1908.

2) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 52, S. 238 ff., 1894; Bd. 66, S. 767, 1898; Bd. 67, S. 790, 1899.

3) S. oben S. 239.

$s's$ vorläufig gewählt und die Klemme k fest zugeschraubt ist, streut man feinkörnigen, gut geschlämmten Sand in ganz geringer Menge auf den Stab und streicht die Gabel an. Ordnet sich der Sand nicht sofort in völlig geraden Knotenlinien ganz genau senkrecht zur Längsachse des Stabes, so muß man diesen millimeterweise solange verschieben, bis man merkt, daß der Sand sich regelmäßig ordnen will. Dann genügt vielleicht eine Verlängerung oder Verkürzung um einen Bruchteil eines Millimeters, und die reguläre Knotenfigur ist augenblicklich beim Anstreichen da. Nunmehr ist die Gabel unison mit einem der Teiltöne des Stabes. Die Schwingungszahl desselben ergibt sich aus der Seebeckschen Formel: $N = \frac{\varepsilon^2 \cdot \pi \cdot h}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot L^2} \sqrt{\frac{E \cdot g}{s}}$, worin E den Elastizitätsmodulus, g die Beschleunigung durch die Schwere, s das spezifische Gewicht, L die (sehr genau zu messende) Länge des Stabteiles $s's$ und h die Dicke bedeutet. Die Größe ε ist gleich $k + 0{,}5$ zu setzen, wenn unter k die Anzahl der Knotenlinien verstanden wird.

Die Seebecksche Formel kann nach Melde bis zum 12. Teilton des Stabes (bei dem 11 Knotenlinien auftreten, da die Ordnungszahl der Partialtöne $= k + 1$ ist) ohne Korrektion benutzt werden. Es ist aber, namentlich mit Rücksicht auf eine gewisse Unsicherheit der Werte E und s, besser, die Konstanten ganz zu eliminieren. Zu diesem Zwecke verfährt man nach Melde so, daß man auf dem betreffenden Stabe zunächst mit einer Gabel von genau bekannter Schwingungszahl N_1 eine exakte Knotenfigur hervorruft. Es ist alsdann $N_1 = \frac{\varepsilon_1^2}{L_1^2} \cdot K$, wobei unter K die Konstanten der Formel zusammengefaßt sind, und wenn man nun für die unbekannte Schwingungszahl einer anderen Gabel $N = \frac{\varepsilon^2}{L^2} \cdot K$ findet, so ergibt sich aus $N_1 : N = \frac{\varepsilon_1^2}{L_1^2} : \frac{\varepsilon^2}{L^2}$ das Resultat $N = \frac{\varepsilon^2}{L_2} \cdot \frac{L_1^2}{\varepsilon_1^2} \cdot N_1$.

Neuerdings ist von H. J. L. Struycken auch die, tieferen Tönen gegenüber bereits früher gelegentlich angewendete Photographie der Tonwellen zur Bestimmung höchster Schwingungszahlen nutzbar gemacht worden. Das den verschiedenen Modifikationen seiner Methodik zugrunde liegende gemeinsame Prinzip ist das, daß die zu prüfende Tonquelle und eine genau geeichte Standardgabel („Zeitgabel“) ihre Schwingungskurven nebeneinander durch einen Schlitz in der Vorderwand einer photographischen Kamera hindurch auf eine hinter demselben vertikal herabfallende lichtempfindliche Platte entwerfen, nachdem zuvor durch ein Okular in der Rückseite der Kamera die beiden, dem Auge als horizontale Striche erscheinenden, schwingenden Bewegungen scharf eingestellt sind. Aus dem Photogramm wird in bekannter Weise durch Auszählen der Wellengipfel zunächst das Verhältnis der beiden Schwingungszahlen und daraus dann die gesuchte ermittelt.

Struycken verwendet zwei verschiedene Formen von Zeitgabeln. Fig. 77 stellt die beiden Zinkenenden der einen dar. Auf der linken Zinke ist vertikal ein kleines, die Zinkenendfläche überragendes Kupferblättchen angebracht, das oben am inneren Rande mit einer leichten Auskerbung ver-

sehen ist. An den beiden Ecken der letzteren sind mittelst einer Mischung von Kautschuk und Lederleim zwei Ecken eines quadratischen, vertikal und rechtwinklig zur Fläche des Kupferblättchens gerichteten Spiegelchens gelenkig befestigt. Mit der freien Kante des Spiegels ist durch ein gleiches Gelenk die Spitze eines Stiftes verbunden, dessen Basis auf der rechten Gabelzinke fixiert ist. Wird die Gabel in Schwingungen versetzt, so zwingt der Stift den Spiegel zu kleinen hin und her gehenden Drehbewegungen um seine am Kupferblättchen befestigte Kante als Achse, und ein feiner Lichtstrahl, der währenddessen von links her auf den Spiegel trifft, wird im Tempo der Gabel horizontal vibrierend reflektiert.

Diese Zeitgabel pflegt nun Struycken mit seinem Doppelmembran-Apparat (Fig. 78 rechts) zu kombinieren. Es ist das ein Schallkästchen,

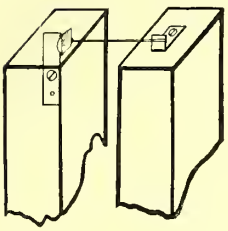


Fig. 77.

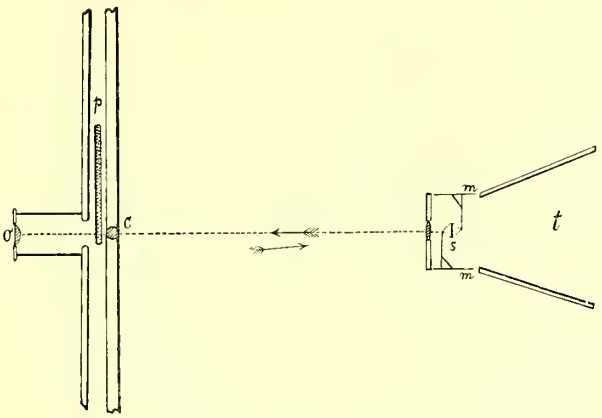


Fig. 78.

dessen Seitenwände m aus dünnen, glatten Blättchen von französischem Pauspapier, dessen Spannung genau eingestellt werden kann, bestehen. In der Mitte des Kästchens befindet sich, um eine vertikale Achse drehbar, ein Spiegelchen s, welches in ingeniöser Weise durch Stiftchen mit den Membranen so verbunden ist, daß es von diesen nach der einen Richtung gewendet wird, wenn sie sich unter der Einwirkung einer durch den Schalltrichter t eindringenden Luftverdichtung ausbauchen, und nach der entgegengesetzten Richtung, wenn sie mit der Phase der Luftverdünnung nach innen gehen. Mittelst dieser Vorrichtung kann ein entsprechend dem unteren Pfeil von einer Lichtquelle auf den Spiegel s geworfener feiner Lichtstrahl in der Richtung des oberen Pfeiles als horizontal und in der Periode des jeweils durch t dem Doppelmembran-Apparat zugeleiteten Tones oszillierender Lichthebel gegen den Schlitz nebst der Zylinderlinse c der (in Fig. 78 links dargestellten) Kamera reflektiert und durch das Okular o als wagerechter Lichtstreifen beobachtet, beziehungsweise auf der herabschießenden photographischen Platte p als vertikale Wellenkurve aufgenommen werden. Zum Zweck einer Schwingungszahlenbestimmung werden Zeitgabel und Doppelmembran-Apparat so zusammen aufgestellt, daß, wenn der zu untersuchende Ton dem Schalltrichter t zugeführt und die Zeitgabel angeschlagen wird, die beiden, von den zwei

Spiegeln kommenden Lichtstrahlen nebeneinander als Lichtstreifen im Okular gesehen werden, worauf man nach passender Einstellung die Platte fallen läßt. Dieses Verfahren ist für Tonhöhen bis zu 6000, allenfalls auch noch 10000 Doppelschwingungen anwendbar.

Eine andere Art von Zeitgabel mit hoher Schwingungszahl stellt Struycken dadurch her, daß an der Zinke eine Borste befestigt wird, welche die richtige Länge hat, um in demselben Tone mitzuschwingen, und auf diese Weise die Amplitude 20- bis 50fach vergrößert. Fig. 79 veranschaulicht eine Versuchsanordnung, bei der diese Zeitgabel, zur Bestimmung der Schwingungszahl einer zweiten Gabel benutzt wird. Eine Kante der letzteren wird vor das Objektiv eines Mikroskops gebracht, das seinerseits vor dem Schlitz der Kamera aufgestellt ist. Der Kreis in Fig. 79 ist das Gesichtsfeld des Mikroskops, der vertikale Durchmesser die Kante der Gabelzinke, die nach Erregung der Gabel zwischen den punktierten vertikalen Linien als Endlagen im Sinne des Pfeiles (am oberen Rande des Kreises) hin und her schwingt; die beiden horizontalen Linien im Kreise sind die Begrenzungen des Schlitzes, in dessen mittlerer Partie man also die vibrierende Gabelkante als horizontalen Schattenstreifen erblickt. Links unten in Fig. 79 befindet sich die Zeitgabel. Wenn sie angeschlagen im Sinne des Doppelpfeiles auf der rechten Zinke schwingt, so macht die Borste, wie in der Zeichnung angegeben, die Bewegung mit vervielfachter Amplitude mit und erscheint, durch den Schlitz betrachtet, ebenfalls als horizontaler Schattenstreifen neben dem von der anderen Gabel herrührenden. Die fallende Platte löst dann wieder diese beiden Streifen in Wellenlinien auf.

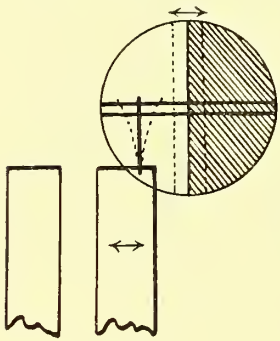


Fig. 79.

Um die Schwingungszahl eines sehr hohen transversalen Saitentones nach dieser Methode zu ermitteln, bringt man einfach die Saite an die Stelle der Gabelzinkenkante vor das Objektiv des Mikroskopes, und zwar am besten so, daß durch den Schlitz die Bewegung des Saitenmittelpunktes aufgenommen wird, weil er von allen Punkten die größte Amplitude hat.

Handelt es sich um einen longitudinalen Saitenton, so wird ein 1 mm langes Stück schwarzen Drahtes von 0,01 mm Dicke mit Kautschuk senkrecht stehend auf die in horizontaler Stellung fixierte Saite geklebt und das Mikroskop darauf eingestellt. Während der Longitudinalschwingung verschiebt sich das Stiftchen in der Periode der Oszillationen parallel mit sich selbst und präsentiert sich also in dem Schlitze der Kamera als horizontal schwingender Punkt. Auf diese Weise gelingt es, Schwingungen bis zu 27000 pro Sekunde aufzunehmen, wenn konzentriertes Sonnenlicht und eine Fallgeschwindigkeit der Platte von 10 m pro Sekunde benutzt wird.

Die photographische Schwingungszahlenbestimmung von Tönen der Galtonpfeife läßt sich nach Struycken auf verschiedenen Wegen erreichen. Das eine Mittel besteht darin, daß man in der aus dem Vorhergehenden bekannten Weise vor dem Schlitze der Kamera die Zeitgabel zu-

sammen mit dem Doppelmembran-Apparat aufstellt und den Galtonton auf letzteren einwirken läßt. Hat das Schallkästchen Papierwände, so gelangt man auf diese Art, wie schon erwähnt wurde, bis in die Gegend des c^6, mit Wänden aus Glimmerplättchen dagegen bis zur Hörgrenze. Steht der Doppelmembran-Apparat nicht zur Verfügung, so kann das folgende Verfahren gewählt werden. Vor den Schlitz der Kassette kommt die Zeitgabel und daneben wieder das Mikroskop. Ein Deckgläschen, welches man aus den diversen käuflichen quadratischen Sorten derart passend aussuchen muß, daß es gut mit dem zu prüfenden Tone mitschwingt, wird an einem kleinen schrägen Stativ mit etwas Klebewachs genau zentriert befestigt und so vor das Objektiv des Mikroskops plaziert, daß seine eine Kante in scharfer Einstellung durch den Schlitz sichtbar wird und beim Erklingen des Galtontones in horizontaler Richtung hin und her gehend die Oszillationen mitmacht. Die Deckgläschenkante vertritt hier sozusagen eine mit dem Galtonton resonierende, vertikal vor dem Schlitz aufgespannte Saite, die ihre Transversalschwingungen neben den Schwingungen der Zeitgabelborste auf die photographische Platte entwirft. In Fig. 80, die zur Erläuterung der Anordnung dienen mag, ist *Obj* die Objektivlinse, die punktierte Linie der einfallende Lichtstrahl, in dem die vibrierende obere Kante des Deckgläschens *D* als Schatten erscheint und das links sichtbare, auf dem Objekttisch fixierte Winkelchen der Träger von *D*. Will man das Abstimmen des Deckglases umgehen, so läßt sich auch ein Stück der als sogenanntes falsches Silberblatt im Handel erhältlichen 0,0001 mm dicken Aluminiumfolie verwenden. Man gibt dem Blättchen am besten eine Länge von 25 und eine Breite von 6 mm, klebt die beiden Schmalseiten mit Vaselin wie vorher das Deckgläschen auf zwei kleine schräge Träger, zieht diese soweit auseinander, bis die Metallfläche schwach gespannt ist — in welchem Zustande sie mit allen Tönen mitschwingt — und stellt das Mikroskop wiederum auf die Kante ein[1]).

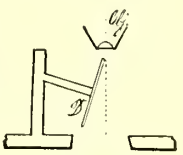


Fig. 80.

Ich lasse nun im Nachstehenden als Anhang zu diesem Kapitel eine Anzahl Tabellen folgen, welche die Werte der Schallgeschwindigkeit und der Tonwellenlängen in Luft bei verschiedenen Temperaturen sowie die Schwingungszahlen der 12-stufig temperierten Tonleiter und der enharmonischen Leiter für verschiedene Kammertöne enthalten.

Die Tabellen I bis VI sind entnommen aus Karl L. Schaefer, Tabellen der Schallgeschwindigkeit und Tonwellenlängen in Luft bei verschiedenen Temperaturen, Passows u. Schaefers Beiträge zur Anat. etc. des Ohres etc., Bd. 1, S. 76 (auch separat erschienen im Verlage von S. Karger, Berlin, 1908), die Tabellen VII bis XII aus C. Stumpf u. K. L. Schaefer, Tontabellen, Leipzig, J. A. Barth, 1901; an diesen Stellen findet man auch das Nähere über die Prinzipien der Berechnung. — Die Tonwellenlängen und die Werte der Schallgeschwindigkeit sind in Metern angegeben.

1) Herr Dr. Struyeken hat die Güte gehabt, mir die Figuren 77—79 eigenhändig für die obige Darstellung zu zeichnen und diese selbst bei der Korrektur zu überprüfen, wofür ich mich zu lebhaftem Danke verpflichtet fühle.

Anhang zum Kapitel Schwingungszahlenbestimmung: Tabellen.

I.

Die Werte der Schallfortpflanzungsgeschwindigkeit in freier (reiner und trockener) Luft gleich $331{,}8\sqrt{1+\alpha t}$ und die Werte von $\sqrt{1+\alpha t}$ [1]) für $t = 0^0$ C. bis $t = 35^0$ C.

($\alpha = 0{,}00367$).

t	$\sqrt{1+\alpha t}$	$331{,}8\sqrt{1+\alpha t}$	t	$\sqrt{1+\alpha t}$	$331{,}8\sqrt{1+\alpha t}$
0°	1,0000	331,8	18°	1,0325	342,6
1°	1,0018	332,4	19°	1,0343	343,2
2°	1,0037	333,0	20°	1,0361	343,8
3°	1,0055	333,6	21°	1,0378	344,4
4°	1,0073	334,2	22°	1,0396	344,9
5°	1,0091	334,8	23°	1,0414	345,5
6°	1,0110	335,4	24°	1,0431	346,1
7°	1,0128	336,0	25°	1,0449	346,7
8°	1,0146	336,6	26°	1,0466	347,3
9°	1,0164	337,2	27°	1,0484	347,9
10°	1,0182	337,8	28°	1,0501	348,4
11°	1,0200	338,4	29°	1,0519	349,0
12°	1,0218	339,0	30°	1,0536	349,6
13°	1,0236	339,6	31°	1,0554	350,2
14°	1,0254	340,2	32°	1,0571	350,7
15°	1,0272	340,8	33°	1,0588	351,3
16°	1,0289	341,4	34°	1,0606	351,9
17°	1,0307	342,0	35°	1,0623	352,5

1) Die Werte von $\sqrt{1+\alpha t}$ sollen hauptsächlich zur Erleichterung der Berechnung der Schallgeschwindigkeit für den Fall dienen, daß jemand für letztere bei 0° einen von 331,8 abweichenden Betrag bevorzugen sollte.

II.

Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter für $a^1 = 435$ Schw. und $t = 12^0$ C.

Töne		C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Subkontra-Oktave	C_2	20,97	19,79	18,68	17,63	16,64	15,71	14,82	13,99	13,21	12,46	11,76	11,10
Kontra-Oktave	C_1	10,48	9,89	9,34	8,81	8,32	7,85	7,41	6,99	6,60	6,23	5,88	5,55
Große Oktave	C	5,24	4,94	4,67	4,40	4,16	3,92	3,70	3,49	3,30	3,11	2,94	2,77
Kleine Oktave	c	2,621	2,474	2,335	2,204	2,080	1,963	1,853	1,749	1,651	1,558	1,471	1,388
1-gestrichene Oktave	c^1	1,310	1,237	1,167	1,102	1,040	0,981	0,926	0,874	0,825	0,779	0,735	0,694
2-gestrichene Oktave	c^2	0,655	0,618	0,583	0,551	0,520	0,490	0,463	0,437	0,412	0,389	0,367	0,347
3-gestrichene Oktave	c^3	0,3276	0,3092	0,2919	0,2755	0,2600	0,2454	0,2317	0,2186	0,2064	0,1948	0,1839	0,1735
4-gestrichene Oktave	c^4	0,1638	0,1546	0,1459	0,1377	0,1300	0,1227	0,1158	0,1093	0,1032	0,0974	0,0919	0,0867
5-gestrichene Oktave	c^5	0,0819	0,0773	0,0729	0,0688	0,0650	0,0613	0,0579	0,0546	0,0516	0,0487	0,0459	0,0433
6-gestrichene Oktave	c^6	0,04095	0,03866	0,03649	0,03444	0,03250	0,03068	0,02896	0,02733	0,02580	0,02435	0,02298	0,02169
7-gestrichene Oktave	c^7	0,02047	0,01933	0,01824	0,01722	0,01625	0,01534	0,01448	0,01366	0,01290	0,01217	0,01149	0,01084
8-gestrichene Oktave	c^8	0,01023	0,00966	0,00912	0,00861	0,00812	0,00767	0,00724	0,00683	0,00645	0,00608	0,00574	0,00542
9-gestrichene Oktave	c^9	0,00511	0,00483	0,00456	0,00430	0,00406	0,00383	0,00362	0,00341	0,00322	0,00304	0,00287	0,00271

III.

Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter für $a^1 = 435$ Schw. und $t = 15^0$ C.

Töne		C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Subkontra-Oktave	C_2	21,08	19,89	18,78	17,72	16,73	15,79	14,90	14,06	13,28	12,53	11,83	11,16
Kontra-Oktave	C_1	10,54	9,94	9,39	8,86	8,36	7,89	7,45	7,03	6,64	6,26	5,91	5,58
Große Oktave	C	5,27	4,97	4,69	4,43	4,18	3,94	3,72	3,51	3,32	3,13	2,95	2,79
Kleine Oktave	c	2,635	2,487	2,347	2,215	2,091	1,974	1,863	1,758	1,660	1,566	1,478	1,395
1-gestrichene Oktave	c^1	1,317	1,243	1,173	1,107	1,045	0,987	0,931	0,879	0,830	0,783	0,739	0,697
2-gestrichene Oktave	c^2	0,658	0,621	0,586	0,553	0,522	0,493	0,465	0,439	0,415	0,391	0,369	0,348
3-gestrichene Oktave	c^3	0,3293	0,3109	0,2934	0,2769	0,2614	0,2467	0,2329	0,2198	0,2075	0,1958	0,1848	0,1744
4-gestrichene Oktave	c^4	0,1646	0,1554	0,1467	0,1384	0,1307	0,1233	0,1164	0,1099	0,1037	0,0979	0,0924	0,0872
5-gestrichene Oktave	c^5	0,0823	0,0777	0,0733	0,0692	0,0653	0,0616	0,0582	0,0549	0,0518	0,0489	0,0462	0,0436
6-gestrichene Oktave	6^6	0,04117	0,03886	0,03668	0,03462	0,03267	0,03084	0,02911	0,02748	0,02593	0,02448	0,02310	0,02181
7-gestrichene Oktave	c^7	0,02058	0,01943	0,01834	0,01731	0,01633	0,01542	0,01455	0,01374	0,01296	0,01224	0,01155	0,01090
8-gestrichene Oktave	c^8	0,01029	0,00971	0,00917	0,00865	0,00816	0,00771	0,00727	0,00687	0,00648	0,00612	0,00577	0,00545
9-gestrichene Oktave	c^9	0,00514	0,00485	0,00458	0,00432	0,00408	0,00385	0,00363	0,00343	0,00324	0,00306	0,00288	0,00272

IV.

Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter für $a^1 = 435$ Schw. und $t = 18^0$ C.

Töne		C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Subkontra-Oktave	C_2	21,19	20,00	18,87	17,81	16,81	15,87	14,98	14,14	13,34	12,60	11,89	11,22
Kontra-Oktave	C_1	10,59	10,00	9,43	8,90	8,40	7,93	7,49	7,07	6,67	6,30	5,94	5,61
Große Oktave	C	5,29	5,00	4,71	4,45	4,20	3,96	3,74	3,53	3,33	3,15	2,97	2,80
Kleine Oktave	c	2,648	2,500	2,359	2,227	2,102	1,984	1,873	1,767	1,668	1,575	1,486	1,403
1-gestrichene Oktave	c^1	1,324	1,250	1,179	1,113	1,051	0,992	0,936	0,883	0,834	0,787	0,743	0,701
2-gestrichene Oktave	c^2	0,662	0,625	0,589	0,556	0,525	0,496	0,468	0,441	0,417	0,393	0,371	0,350
3-gestrichene Oktave	c^3	0,3311	0,3125	0,2949	0,2784	0,2627	0,2480	0,2341	0,2209	0,2085	0,1968	0,1858	0,1753
4-gestrichene Oktave	c^4	0,1655	0,1562	0,1474	0,1392	0,1313	0,1240	0,1170	0,1104	0,1042	0,0984	0,0929	0,0876
5-gestrichene Oktave	c^5	0,0827	0,0781	0,0737	0,0696	0,0656	0,0620	0,0585	0,0552	0,0521	0,0492	0,0464	0,0438
6-gestrichene Oktave	c^6	0,04138	0,03906	0,03687	0,03480	0,03284	0,03100	0,02926	0,02762	0,02607	0,02460	0,02322	0,02192
7-gestrichene Oktave	c^7	0,02069	0,01953	0,01843	0,01740	0,01642	0,01550	0,01463	0,01381	0,01303	0,01230	0,01161	0,01096
8-gestrichene Oktave	c^8	0,01034	0,00976	0,00921	0,00870	0,00821	0,00775	0,00731	0,00690	0,00651	0,00615	0,00580	0,00548
9-gestrichene Oktave	c^9	0,00517	0,00488	0,00460	0,00435	0,00410	0,00387	0,00365	0,00345	0,00325	0,00307	0,00290	0,00274

V.

Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter für $a^1 = 435$ Schw. und $t = 21^0$ C.

Töne		C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Subkontra-Oktave	C_2	21,29	20,10	18,97	17,91	16,90	15,95	15,06	14,21	13,41	12,66	11,95	11,28
Kontra-Oktave	C_1	10,64	10,05	9,48	8,95	8,45	7,97	7,53	7,10	6,70	6,33	5,97	5,64
Große Oktave	C	5,32	5,02	4,74	4,47	4,22	3,98	3,76	3,55	3,35	3,16	2,98	2,82
Kleine Oktave	c	2,662	2,513	2,371	2,238	2,113	1,994	1,882	1,776	1,677	1,583	1,494	1,410
1-gestrichene Oktave	c^1	1,331	1,256	1,185	1,119	1,056	0,997	0,941	0,888	0,838	0,791	0,747	0,705
2-gestrichene Oktave	c^2	0,665	0,628	0,592	0,559	0,528	0,498	0,470	0,444	0,419	0,395	0,373	0,352
3-gestrichene Oktave	c^3	0,3328	0,3141	0,2964	0,2798	0,2641	0,2493	0,2353	0,2221	0,2096	0,1978	0,1867	0,1762
4-gestrichene Oktave	c^4	0,1664	0,1570	0,1482	0,1399	0,1320	0,1246	0,1176	0,1110	0,1048	0,0989	0,0933	0,0881
5-gestrichene Oktave	c^5	0,0832	0,0785	0,0741	0,0699	0,0660	0,0623	0,0588	0,0555	0,0524	0,0494	0,0466	0,0440
6-gestrichene Oktave	c^6	0,04160	0,03926	0,03706	0,03498	0,03301	0,03116	0,02941	0,02776	0,02620	0,02473	0,02334	0,02203
7-gestrichene Oktave	c^7	0,02080	0,01963	0,01853	0,01749	0,01650	0,01558	0,01470	0,01388	0,01310	0,01236	0,01167	0,01101
8-gestrichene Oktave	c^8	0,01040	0,00981	0,00926	0,00874	0,00825	0,00779	0,00735	0,00694	0,00655	0,00618	0,00583	0,00550
9-gestrichene Oktave	c^9	0,00520	0,00490	0,00463	0,00437	0,00412	0,00389	0,00367	0,00347	0,00327	0,00309	0,00291	0,00275

VI.

Tonwellenlängen der temperierten 12-stufigen Leiter für $a^1 = 435$ Schw. und $t = 24^0$ C.

Töne		C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Subkontra-Oktave	C_2	21,40	20,20	19,07	18,00	16,99	16,03	15,13	14,28	13,48	12,72	12,01	11,34
Kontra-Oktave	C_1	10,70	10,10	9,53	9,00	8,49	8,01	7,56	7,14	6,74	6,36	6,00	5,67
Große Oktave	C	5,35	5,05	4,76	4,50	4,24	4,00	3,78	3,57	3,37	3,18	3,00	2,83
Kleine Oktave	c	2,676	2,525	2,384	2,250	2,123	2,004	1,892	1,786	1,685	1,591	1,501	1,417
1-gestrichene Oktave	c^1	1,338	1,262	1,192	1,125	1,061	1,002	0,946	0,893	0,842	0,795	0,750	0,708
2-gestrichene Oktave	c^2	0,669	0,631	0,596	0,562	0,530	0,501	0,473	0,446	0,421	0,397	0,375	0,354
3-gestrichene Oktave	c^3	0,3345	0,3157	0,2980	0,2812	0,2654	0,2505	0,2365	0,2232	0,2107	0,1988	0,1877	0,1771
4-gestrichene Oktave	c^4	0,1672	0,1578	0,1490	0,1406	0,1327	0,1252	0,1182	0,1116	0,1053	0,0994	0,0938	0,0885
5-gestrichene Oktave	c^5	0,0836	0,0789	0,0745	0,0703	0,0663	0,0626	0,0591	0,0558	0,0526	0,0497	0,0469	0,0442
6-gestrichene Oktave	c^6	0,04181	0,03946	0,03725	0,03516	0,03318	0,03132	0,02956	0,02790	0,02634	0,02486	0,02346	0,02214
7-gestrichene Oktave	c^7	0,02090	0,01973	0,01862	0,01758	0,01659	0,01566	0,01478	0,01395	0,01317	0,01243	0,01173	0,01107
8-gestrichene Oktave	c^8	0,01045	0,00986	0,00931	0,00879	0,00829	0,00783	0,00739	0,00697	0,00658	0,00621	0,00586	0,00553
9-gestrichene Oktave	c^9	0,00522	0,00493	0,00465	0,00439	0,00414	0,00391	0,00369	0,00348	0,00329	0,00310	0,00293	0,00276

VII.

Schwingungszahlen der temperierten 12-stufigen Leiter für $C_2 = 16$, $a^1 = 430{,}54$.

Töne	C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Ableitung $\sqrt[12]{2}$	$= \frac{\text{cis}}{(c=)1}$	$= \frac{d}{cis}$	$= \frac{dis}{d}$	$= \frac{e}{dis}$	$= \frac{f}{e}$	$= \frac{fis}{f}$	$= \frac{g}{fis}$	$= \frac{gis}{g}$	$= \frac{a}{gis}$	$= \frac{ais}{a}$	$= \frac{h}{ais}$	$= \frac{(c=)2}{h}$
Verhältnisse zu C	1	$\sqrt[12]{2}$	$\sqrt[12]{2^2}$	$\sqrt[12]{2^3}$	$\sqrt[12]{2^4}$	$\sqrt[12]{2^5}$	$\sqrt[12]{2^6}$	$\sqrt[12]{2^7}$	$\sqrt[12]{2^8}$	$\sqrt[12]{2^9}$	$\sqrt[12]{2^{10}}$	$\sqrt[12]{2^{11}}$
	1,00000	1,05946	1,12246	1,18921	1,25992	1,33484	1,41421	1,49831	1,58740	1,68179	1,78180	1,88775
Subkontra-Oktave C_2	16	16,95	17,96	19,03	20,16	21,36	22,63	23,97	25,40	26,91	28,51	30,20
Kontra-Oktave C_1	32	33,90	35,92	38,05	40,32	42,71	45,25	47,95	50,80	53,82	57,02	60,41
Große Oktave C	64	67,81	71,84	76,11	80,63	85,43	90,51	95,89	101,59	107,63	114,04	120,82
Kleine Oktave c	128	135,61	143,68	152,22	161,27	170,86	181,02	191,78	203,19	215,27	228,07	241,63
1-gestrichene Oktave c^1	256	271,22	287,35	304,44	322,54	341,72	362,04	383,57	406,37	430,54	456,14	483,26
2-gestrichene Oktave c^2	512	542,45	574,70	608,87	645,08	683,44	724,08	767,13	812,75	861,08	912,28	966,53
3-gestrichene Oktave c^3	1024	1084,89	1149,40	1217,75	1290,16	1366,88	1448,15	1534,27	1625,50	1722,16	1824,56	1933,05
4-gestrichene Oktave c^4	2048	2169,78	2298,80	2435,50	2580,32	2733,75	2896,31	3068,53	3251,00	3444,31	3649,12	3866,11
5-gestrichene Oktave c^5	4096	4339,56	4597,60	4870,99	5160,64	5467,50	5792,62	6137,07	6501,99	6888,62	7298,24	7732,22
6-gestrichene Oktave c^6	8192	8679,12	9195,21	9741,98	10321,27	10935,01	11585,24	12274,13	13003,99	13777,25	14596,48	15464,44

Schwingungszahlen der temperierten 12-stufigen Leiter für $C_2 = 16{,}17$, $a^1 = 435$.

Töne	C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Ableitung: $\sqrt[12]{2}$ =	$\frac{\text{cis}}{(\text{c}=)1}$ =	$\frac{\text{d}}{\text{cis}}$ =	$\frac{\text{dis}}{\text{d}}$ =	$\frac{\text{e}}{\text{dis}}$ =	$\frac{\text{f}}{\text{e}}$ =	$\frac{\text{fis}}{\text{f}}$ =	$\frac{\text{g}}{\text{fis}}$ =	$\frac{\text{gis}}{\text{g}}$ =	$\frac{\text{a}}{\text{gis}}$ =	$\frac{\text{ais}}{\text{a}}$ =	$\frac{\text{h}}{\text{ais}}$ =	$\frac{(\text{c}=)2}{\text{h}}$
Verhältnisse zu C	1	$\sqrt[12]{2}$	$\sqrt[12]{2^2}$	$\sqrt[12]{2^3}$	$\sqrt[12]{2^4}$	$\sqrt[12]{2^5}$	$\sqrt[12]{2^6}$	$\sqrt[12]{2^7}$	$\sqrt[12]{2^8}$	$\sqrt[12]{2^9}$	$\sqrt[12]{2^{10}}$	$\sqrt[12]{2^{11}}$
	1,00000	1,05946	1,12246	1,18921	1,25992	1,33484	1,41421	1,49831	1,58740	1,68179	1,78180	1,88775
Subkontra-Oktave C_2	16,17	17,13	18,15	19,22	20,37	21,58	22,86	24,22	25,66	27,19	28,80	30,52
Kontra-Oktave C_1	32,33	34,25	36,29	38,45	40,74	43,16	45,72	48,44	51,32	54,38	57,61	61,03
Große Oktave C	64,66	68,51	72,58	76,90	81,47	86,31	91,45	96,89	102,65	108,75	115,22	122,07
Kleine Oktave c	129,33	137,02	145,16	153,80	162,94	172,63	182,89	193,77	205,29	217,50	230,43	244,14
1-gestrichene Oktave c^1	258,65	274,03	290,33	307,59	325,88	345,26	365,79	387,54	410,59	435,00	460,87	488,27
2-gestrichene Oktave c^2	517,31	548,07	580,66	615,18	651,76	690,52	731,58	775,08	821,17	870,00	921,73	976,54
3-gestrichene Oktave c^3	1034,61	1096,13	1161,31	1230,37	1303,53	1381,04	1463,16	1550,16	1642,34	1740,00	1843,47	1953,08
4-gestrichene Oktave c^4	2069,22	2192,26	2322,62	2460,73	2607,05	2762,08	2926,32	3100,33	3284,68	3480,00	3686,93	3906,17
5-gestrichene Oktave c^5	4138,44	4384,53	4645,24	4921,46	5214,11	5524,16	5852,64	6200,66	6569,37	6960,00	7373,86	7812,34
6-gestrichene Oktave c^6	8276,88	8769,05	9290,49	9842,93	10428,22	11048,31	11705,28	12401,31	13138,73	13920,00	14747,73	15624,67

IX.

Schwingungszahlen der temperierten 12-stufigen Leiter für $C_2 = 16{,}35$, $a^1 = 440$.

Töne	C	Cis Des	D	Dis Es	E	F	Fis Ges	G	Gis As	A	Ais B	H
Ableitung: $\sqrt[12]{2}$ =	cis / (c =)1 =	d / cis =	dis / d =	c / dis =	f / c =	fis / f =	g / fis =	gis / g =	a / gis =	ais / a =	h / ais =	(c =)2 / h
Verhältnisse zu C	1	$\sqrt[12]{2^2}$	$\sqrt[12]{2^3}$	$\sqrt[12]{2^4}$	$\sqrt[12]{2^5}$	$\sqrt[12]{2^6}$	$\sqrt[12]{2^7}$	$\sqrt[12]{2^8}$	$\sqrt[12]{2^9}$	$\sqrt[12]{2^{10}}$	$\sqrt[12]{2^{11}}$	
	1,00000	1,05946	1,12246	1,18921	1,25992	1,33484	1,41421	1,49831	1,58740	1,68179	1,78180	1,88775
Subkontra-Oktave C_2	16,35	17,32	18,35	19,45	20,60	21,83	23,12	24,50	25,96	27,50	29,14	30,87
Kontra-Oktave C_1	32,70	34,65	36,71	38,89	41,20	43,65	46,25	49,00	51,91	55,00	58,27	61,74
Große Oktave C	65,41	69,30	73,42	77,78	82,41	87,31	92,50	98,00	103,83	110,00	116,54	123,47
Kleine Oktave c	130,81	138,59	146,83	155,56	164,81	174,61	185,00	196,00	207,65	220,00	233,08	246,94
1-gestrichene Oktave c^1	261,63	277,18	293,66	311,13	329,63	349,23	369,99	392,00	415,30	440,00	466,16	493,88
2-gestrichene Oktave c^2	523,25	554,37	587,33	622,25	659,26	698,46	739,99	783,99	830,61	880,00	932,33	987,77
3-gestrichene Oktave c^3	1046,50	1108,73	1174,66	1244,51	1318,51	1396,91	1479,98	1567,98	1661,22	1760,00	1864,66	1975,53
4-gestrichene Oktave c^4	2093,00	2217,46	2349,32	2489,02	2637,02	2793,83	2959,96	3135,96	3322,44	3520,00	3729,31	3951,07
5-gestrichene Oktave c^5	4186,01	4434,92	4698,64	4978,03	5274,04	5587,65	5919,91	6271,93	6644,88	7040,00	7458,62	7902,13
6-gestrichene Oktave c^6	8372,02	8869,84	9397,27	9956,06	10548,08	11175,30	11839,82	12543,85	13289,75	14080,00	14917,24	15804,27

X.

Schwingungszahlen der enharmonischen Leiter für $C_2 = 16$, $a^1 = 426\frac{2}{3}$.

Töne	C	Cis	Des	D	D	Dis	Es	E	Fes	Eis	F	Fis	Fis	Ges	G	Gis	As	A	Ais	I	B	B	H	Ces	His
Ableitung[1]	—	$\frac{T}{t}$	$\frac{q}{T}$	$\frac{q}{t}$	$\frac{Q}{q}$	$\frac{TT}{q}$	t	T	$\frac{s}{T}$	$\frac{TT}{t}$	q	$\frac{S}{t}$	$\frac{QT}{q}$	tt	Q	TT	s	S	$\frac{ST}{t}$	$\frac{7}{4}$	qq	Qt	QT	st	TTT
Verhältnisse zu C	1	$\frac{25}{24}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{75}{64}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{32}{25}$	$\frac{125}{96}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{25}{18}$	$\frac{45}{32}$	$\frac{36}{25}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{25}{16}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{125}{72}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{16}{9}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{18}{25}$	$\frac{125}{64}$
	1,0000	1,0417	1,0667	1,1111	1,1250	1,1719	1,2000	1,2500	1,2800	1,3021	1,3333	1,3889	1,4063	1,4400	1,5000	1,5625	1,6000	1,6667	1,7361	1,7500	1,7778	1,8000	1,8750	1,9200	1,9531
Subkontra-Oktave C_2	16	$16\frac{2}{3}$	$17\frac{1}{15}$	$17\frac{7}{9}$	18	$18\frac{3}{4}$	$19\frac{1}{5}$	20	$20\frac{12}{25}$	$20\frac{5}{6}$	$21\frac{1}{3}$	$22\frac{2}{9}$	$22\frac{1}{2}$	$23\frac{1}{25}$	24	25	$25\frac{3}{5}$	$26\frac{2}{3}$	$27\frac{7}{9}$	28	$28\frac{1}{9}$	$28\frac{4}{5}$	30	$30\frac{18}{25}$	$31\frac{1}{4}$
Kontra-Oktave C_1	32	$33\frac{1}{3}$	$34\frac{2}{15}$	$35\frac{5}{9}$	36	$37\frac{1}{2}$	$38\frac{2}{5}$	40	$40\frac{24}{25}$	$41\frac{2}{3}$	$42\frac{2}{3}$	$44\frac{4}{9}$	45	$46\frac{2}{25}$	48	50	$51\frac{1}{5}$	$53\frac{1}{3}$	$55\frac{5}{9}$	56	$56\frac{8}{9}$	$57\frac{3}{5}$	60	$61\frac{11}{25}$	$62\frac{1}{2}$
Große Oktave C	64	$66\frac{2}{3}$	$68\frac{4}{15}$	$71\frac{1}{9}$	72	75	$76\frac{4}{5}$	80	$81\frac{23}{25}$	$83\frac{1}{3}$	$85\frac{1}{3}$	$88\frac{8}{9}$	90	$92\frac{1}{25}$	96	100	$102\frac{2}{5}$	$106\frac{2}{3}$	$111\frac{1}{9}$	112	$113\frac{7}{9}$	$115\frac{1}{5}$	120	$122\frac{22}{25}$	125
Kleine Oktave c	128	$133\frac{1}{3}$	$136\frac{8}{15}$	$142\frac{2}{9}$	144	150	$153\frac{3}{5}$	160	$163\frac{21}{25}$	$166\frac{2}{3}$	$170\frac{2}{3}$	$177\frac{7}{9}$	180	$184\frac{8}{25}$	192	200	$204\frac{1}{5}$	$213\frac{1}{3}$	$222\frac{2}{9}$	224	$227\frac{5}{9}$	$230\frac{2}{5}$	240	$245\frac{19}{25}$	250
1-gestrichene Oktave c^1	256	$266\frac{2}{3}$	$273\frac{1}{15}$	$284\frac{4}{9}$	288	300	$307\frac{1}{5}$	320	$327\frac{17}{25}$	$333\frac{1}{3}$	$341\frac{1}{3}$	$355\frac{5}{9}$	360	$368\frac{16}{25}$	384	400	$409\frac{3}{5}$	$426\frac{2}{3}$	$444\frac{4}{9}$	448	$455\frac{1}{9}$	$460\frac{4}{5}$	480	$491\frac{13}{25}$	500
2-gestrichene Oktave c^2	512	$533\frac{1}{3}$	$546\frac{2}{15}$	$568\frac{8}{9}$	576	600	$614\frac{2}{5}$	640	$655\frac{9}{25}$	$666\frac{2}{3}$	$682\frac{2}{3}$	$711\frac{1}{9}$	720	$737\frac{1}{25}$	768	800	$819\frac{1}{5}$	$853\frac{1}{3}$	$888\frac{8}{9}$	896	$910\frac{2}{9}$	$921\frac{3}{5}$	960	$983\frac{1}{25}$	1000
3-gestrichene Oktave c^3	1024	$1066\frac{2}{3}$	$1092\frac{4}{15}$	$1137\frac{7}{9}$	1152	1200	$1228\frac{4}{5}$	1280	$1310\frac{18}{25}$	$1333\frac{1}{3}$	$1365\frac{1}{3}$	$1422\frac{2}{9}$	1440	$1474\frac{14}{25}$	1536	1600	$1638\frac{2}{5}$	$1706\frac{2}{3}$	$1777\frac{7}{9}$	1792	$1820\frac{4}{9}$	$1843\frac{1}{5}$	1920	$1966\frac{2}{25}$	2000
4-gestrichene Oktave c^4	2048	$2133\frac{1}{3}$	$2184\frac{8}{15}$	$2275\frac{5}{9}$	2304	2400	$2457\frac{3}{5}$	2560	$2621\frac{11}{25}$	$2666\frac{2}{3}$	$2730\frac{2}{3}$	$2844\frac{4}{9}$	2880	$2949\frac{3}{25}$	3072	3200	$3276\frac{1}{5}$	$3413\frac{1}{3}$	$3555\frac{5}{9}$	3584	$3640\frac{8}{9}$	$3686\frac{2}{5}$	3840	$3932\frac{4}{25}$	4000
5-gestrichene Oktave c^5	4096	$4266\frac{2}{3}$	$4369\frac{1}{15}$	$4551\frac{1}{9}$	4608	4800	$4915\frac{1}{5}$	5120	$5242\frac{22}{25}$	$5333\frac{1}{3}$	$5461\frac{1}{3}$	$5688\frac{8}{9}$	5760	$5898\frac{6}{25}$	6144	6400	$6553\frac{3}{5}$	$6826\frac{2}{3}$	$7111\frac{1}{9}$	7168	$7281\frac{7}{9}$	$7372\frac{1}{5}$	7680	$7864\frac{8}{25}$	8000
6-gestrichene Oktave c^6	8192	$8533\frac{1}{3}$	$8738\frac{2}{15}$	$9102\frac{2}{9}$	9216	9600	$9830\frac{2}{5}$	10240	$10485\frac{19}{25}$	$10666\frac{2}{3}$	$10922\frac{2}{3}$	$11377\frac{7}{9}$	11520	$11796\frac{12}{25}$	12288	12800	$13107\frac{1}{5}$	$13653\frac{1}{3}$	$14222\frac{2}{9}$	14336	$14563\frac{5}{9}$	$14745\frac{3}{5}$	15360	$15728\frac{16}{25}$	16000

XI.

Schwingungszahlen der enharmonischen Leiter für $C_2 = 16\frac{5}{16}$, $a^1 = 435$.

Subkontra-Oktave C_2	$16\frac{5}{16}$	$16\frac{127}{128}$	$17\frac{2}{5}$	$18\frac{1}{8}$	$18\frac{45}{128}$	$19\frac{119}{1024}$	$19\frac{23}{40}$	$20\frac{25}{64}$	$20\frac{22}{25}$	$21\frac{123}{512}$	$21\frac{3}{4}$	$22\frac{21}{32}$	$22\frac{481}{512}$	$23\frac{49}{100}$	$24\frac{15}{32}$	$25\frac{125}{256}$	$26\frac{1}{10}$	$27\frac{3}{16}$	$28\frac{11}{128}$	$28\frac{33}{64}$	29	$29\frac{29}{80}$	$30\frac{75}{128}$	$31\frac{8}{25}$	$31\frac{881}{1024}$
Kontra-Oktave C_1	$32\frac{5}{8}$	$33\frac{63}{64}$	$34\frac{4}{5}$	$36\frac{1}{4}$	$36\frac{45}{64}$	$38\frac{119}{512}$	$39\frac{3}{20}$	$40\frac{25}{32}$	$41\frac{19}{25}$	$42\frac{123}{256}$	$43\frac{1}{2}$	$45\frac{5}{16}$	$45\frac{225}{256}$	$46\frac{49}{50}$	$48\frac{15}{16}$	$50\frac{125}{128}$	$52\frac{1}{5}$	$54\frac{3}{8}$	$56\frac{11}{64}$	$57\frac{3}{32}$	58	$58\frac{29}{40}$	$61\frac{11}{64}$	$62\frac{19}{25}$	$63\frac{109}{512}$
Große Oktave C	$65\frac{1}{4}$	$67\frac{31}{32}$	$69\frac{3}{5}$	$72\frac{1}{2}$	$73\frac{13}{32}$	$76\frac{119}{256}$	$78\frac{3}{10}$	$81\frac{9}{16}$	$83\frac{13}{25}$	$84\frac{123}{128}$	87	$90\frac{6}{8}$	$91\frac{97}{128}$	$93\frac{24}{25}$	$97\frac{7}{8}$	$101\frac{61}{64}$	$104\frac{2}{5}$	$108\frac{3}{4}$	$113\frac{9}{32}$	$114\frac{3}{16}$	116	$117\frac{9}{20}$	$122\frac{11}{32}$	$125\frac{7}{25}$	$127\frac{113}{256}$
Kleine Oktave c	$130\frac{1}{2}$	$135\frac{15}{16}$	$139\frac{1}{5}$	145	$146\frac{13}{16}$	$152\frac{119}{128}$	$156\frac{3}{5}$	$163\frac{1}{8}$	$167\frac{1}{25}$	$169\frac{59}{64}$	174	$181\frac{1}{4}$	$183\frac{33}{64}$	$187\frac{23}{25}$	$195\frac{3}{4}$	$203\frac{29}{32}$	$208\frac{4}{5}$	$217\frac{1}{2}$	$226\frac{9}{16}$	$228\frac{3}{8}$	232	$234\frac{9}{10}$	$244\frac{11}{16}$	$250\frac{1}{25}$	$254\frac{113}{128}$
1-gestrichene Oktave c^1	261	$271\frac{7}{8}$	$278\frac{2}{5}$	290	$293\frac{5}{8}$	$305\frac{55}{64}$	$313\frac{1}{5}$	$326\frac{1}{4}$	$334\frac{2}{25}$	$339\frac{27}{32}$	348	$362\frac{1}{2}$	$367\frac{1}{32}$	$375\frac{21}{25}$	$391\frac{1}{2}$	$407\frac{13}{16}$	$417\frac{3}{5}$	435	$453\frac{1}{8}$	$456\frac{3}{4}$	464	$469\frac{1}{5}$	$489\frac{3}{8}$	$501\frac{1}{25}$	$509\frac{19}{64}$
2-gestrichene Oktave e^2	522	$543\frac{3}{4}$	$556\frac{4}{5}$	580	$587\frac{1}{4}$	$611\frac{23}{32}$	$626\frac{2}{5}$	$652\frac{1}{2}$	$668\frac{4}{25}$	$679\frac{11}{16}$	696	725	$734\frac{1}{16}$	$751\frac{17}{25}$	783	$815\frac{5}{8}$	$835\frac{1}{5}$	870	$906\frac{1}{4}$	$913\frac{1}{2}$	928	$939\frac{2}{5}$	$978\frac{3}{4}$	$1002\frac{6}{25}$	$1019\frac{17}{32}$
3-gestrichene Oktave e^3	1044	$1087\frac{1}{2}$	$1113\frac{3}{5}$	1160	$1174\frac{1}{2}$	$1223\frac{7}{16}$	$1252\frac{4}{5}$	1305	$1336\frac{8}{25}$	$1359\frac{3}{8}$	1392	1450	$1468\frac{1}{8}$	$1503\frac{9}{25}$	1566	$1631\frac{1}{4}$	$1670\frac{2}{5}$	1740	$1812\frac{1}{2}$	1827	1856	$1879\frac{1}{5}$	$1957\frac{1}{2}$	$2004\frac{12}{25}$	$2039\frac{1}{16}$
4-gestrichene Oktave e^4	2088	2175	$2227\frac{1}{5}$	2320	2349	$2446\frac{7}{8}$	$2505\frac{3}{5}$	2610	$2672\frac{16}{25}$	$2718\frac{3}{4}$	2784	2900	$2936\frac{1}{4}$	$3006\frac{18}{25}$	3132	$3262\frac{1}{2}$	$3340\frac{4}{5}$	3480	3625	3654	3712	$3758\frac{3}{5}$	3915	$4008\frac{21}{25}$	$4078\frac{1}{8}$
5-gestrichene Oktave e^5	4176	4350	$4454\frac{2}{5}$	4640	4698	$4893\frac{3}{4}$	$5011\frac{1}{5}$	5220	$5345\frac{7}{25}$	$5437\frac{1}{2}$	5568	5800	$5872\frac{1}{2}$	$6013\frac{11}{25}$	6264	6525	$6681\frac{3}{5}$	6960	7250	7308	7424	$7516\frac{1}{5}$	7830	$8017\frac{23}{25}$	$8156\frac{1}{4}$
6-gestrichene Oktave e^6	8352	8700	$8908\frac{4}{5}$	9280	9396	$9787\frac{1}{2}$	$10022\frac{2}{5}$	10440	$10690\frac{14}{25}$	10875	11136	11600	11745	$12026\frac{22}{25}$	12528	13050	$13363\frac{1}{5}$	13920	14500	14616	14848	$15033\frac{3}{5}$	15660	$16035\frac{21}{25}$	$16312\frac{1}{2}$

XII.

Schwingungszahlen der enharmonischen Leiter für $C_2 = 16\frac{1}{2}$, $a^1 = 440$.

Subkontra-Oktave C_2	$16\frac{1}{2}$	$17\frac{3}{16}$	$17\frac{3}{5}$	$18\frac{1}{3}$	$18\frac{9}{16}$	$19\frac{43}{128}$	$19\frac{4}{5}$	$20\frac{5}{8}$	$21\frac{3}{25}$	$21\frac{31}{64}$	22	$22\frac{11}{12}$	$23\frac{13}{64}$	$23\frac{19}{25}$	$24\frac{3}{4}$	$25\frac{25}{32}$	$26\frac{2}{5}$	$27\frac{1}{2}$	$28\frac{31}{48}$	$28\frac{7}{8}$	$29\frac{1}{3}$	$29\frac{7}{19}$	$30\frac{15}{16}$	$31\frac{17}{25}$	$32\frac{29}{128}$
Kontra-Oktave C_1	33	$34\frac{3}{8}$	$35\frac{1}{5}$	$36\frac{2}{3}$	$37\frac{1}{8}$	$38\frac{43}{64}$	$39\frac{3}{5}$	$41\frac{1}{4}$	$42\frac{6}{25}$	$42\frac{31}{32}$	44	$45\frac{5}{6}$	$46\frac{13}{32}$	$47\frac{13}{25}$	$49\frac{1}{2}$	$51\frac{9}{16}$	$52\frac{4}{5}$	55	$57\frac{7}{24}$	$57\frac{3}{4}$	$58\frac{2}{3}$	$59\frac{2}{5}$	$61\frac{7}{8}$	$63\frac{9}{25}$	$64\frac{29}{64}$
Große Oktave C	66	$68\frac{3}{4}$	$70\frac{2}{5}$	$73\frac{1}{3}$	$74\frac{1}{4}$	$77\frac{11}{32}$	$79\frac{1}{5}$	$82\frac{1}{2}$	$84\frac{12}{25}$	$85\frac{15}{16}$	88	$91\frac{2}{3}$	$92\frac{13}{16}$	$95\frac{1}{25}$	99	$103\frac{1}{8}$	$105\frac{3}{5}$	110	$114\frac{7}{12}$	$115\frac{1}{2}$	$117\frac{1}{3}$	$118\frac{1}{5}$	$123\frac{3}{4}$	$126\frac{18}{25}$	$128\frac{29}{32}$
Kleine Oktave c	132	$137\frac{1}{2}$	$140\frac{4}{5}$	$146\frac{2}{3}$	$148\frac{1}{2}$	$154\frac{11}{16}$	$158\frac{2}{5}$	165	$168\frac{24}{25}$	$171\frac{7}{8}$	176	$183\frac{1}{3}$	$185\frac{6}{8}$	$190\frac{2}{25}$	198	$206\frac{1}{4}$	$211\frac{1}{5}$	220	$229\frac{1}{6}$	231	$234\frac{2}{3}$	$237\frac{3}{5}$	$247\frac{1}{2}$	$253\frac{11}{25}$	$257\frac{13}{16}$
1-gestrichene Oktave c^1	264	275	$281\frac{3}{5}$	$293\frac{1}{3}$	297	$309\frac{3}{8}$	$316\frac{4}{5}$	330	$337\frac{23}{25}$	$343\frac{3}{4}$	352	$366\frac{2}{3}$	$371\frac{1}{4}$	$380\frac{4}{25}$	396	$412\frac{1}{2}$	$422\frac{2}{5}$	440	$458\frac{1}{3}$	462	$469\frac{1}{3}$	$475\frac{1}{5}$	495	$506\frac{22}{25}$	$515\frac{5}{8}$
2-gestrichene Oktave c^2	528	550	$563\frac{1}{5}$	$586\frac{2}{3}$	594	$618\frac{3}{4}$	$633\frac{3}{5}$	660	$675\frac{21}{25}$	$687\frac{1}{2}$	704	$733\frac{1}{3}$	$742\frac{1}{2}$	$760\frac{8}{25}$	792	825	$844\frac{1}{5}$	880	$916\frac{2}{3}$	924	$938\frac{2}{3}$	$950\frac{2}{5}$	990	$1013\frac{19}{25}$	$1031\frac{1}{4}$
3-gestrichene Oktave c^3	1056	1100	$1126\frac{2}{5}$	$1173\frac{1}{3}$	1188	$1237\frac{1}{2}$	$1267\frac{1}{5}$	1320	$1351\frac{17}{25}$	1375	1408	$1466\frac{2}{3}$	1485	$1520\frac{16}{25}$	1584	1650	$1689\frac{3}{5}$	1760	$1833\frac{1}{3}$	1848	$1877\frac{1}{3}$	$1900\frac{4}{5}$	1980	$2027\frac{13}{25}$	$2062\frac{1}{2}$
4-gestrichene Oktave c^4	2112	2200	$2252\frac{1}{5}$	$2346\frac{2}{3}$	2376	2475	$2534\frac{2}{5}$	2640	$2703\frac{9}{25}$	2750	2816	$2933\frac{1}{3}$	2970	$3041\frac{7}{25}$	3168	3300	$3379\frac{1}{5}$	3520	$3666\frac{2}{3}$	3696	$3754\frac{2}{3}$	$3801\frac{3}{5}$	3960	$4055\frac{1}{25}$	4125
5-gestrichene Oktave c^5	4224	4400	$4505\frac{3}{5}$	$4693\frac{1}{3}$	4752	4950	$5068\frac{4}{5}$	5280	$5406\frac{18}{25}$	5500	5632	$5866\frac{2}{3}$	5940	$6082\frac{14}{25}$	6336	6600	$6758\frac{2}{5}$	7040	$7333\frac{1}{3}$	7392	$7509\frac{1}{3}$	$7603\frac{1}{5}$	7920	$8110\frac{2}{25}$	8250
6-gestrichene Oktave c^6	8448	8800	$9011\frac{1}{5}$	$9386\frac{2}{3}$	9504	9900	$10137\frac{3}{5}$	10560	$10813\frac{11}{25}$	11000	11264	$11733\frac{1}{3}$	11880	$12165\frac{3}{25}$	12672	13200	$13516\frac{1}{5}$	14080	$14666\frac{2}{3}$	14784	$15018\frac{2}{3}$	$15206\frac{2}{5}$	15840	$16220\frac{4}{25}$	16500

[1] t = kleine Terz = $\frac{6}{5}$ T = große Terz = $\frac{5}{4}$ q = Quarte = $\frac{4}{3}$ Q = Quinte = $\frac{3}{2}$ s = kleine Sexte = $\frac{8}{5}$ S = große Sexte = $\frac{5}{3}$

B. Speziell Physiologisches.

1. Tiefste Töne und Bestimmung der unteren Hörgrenze.

Die Beantwortung der Frage nach der Schwingungszahl des tiefsten noch wahrnehmbaren Tones setzt vor allem voraus, daß die Tonhöhe der betreffenden Schallquelle exakt festzustellen sei. Daher ist die Angabe Sauveurs, der sich nach W. Preyers[1]) historischer Übersicht zuerst mit diesem Problem beschäftigte und $12^1/_2$ Schwingungen als untere Tongrenze bezeichnete, wertlos, weil er für seine Beobachtung eine Orgelpfeife benutzte, deren Schwingungszahl sich nur schätzungsweise ermitteln ließ.

Die Zahnrad- und Löchersirenen gestatten zwar eine genaue Tonhöhenbestimmung, haben indessen die Nachteile, daß die Umlaufsgeschwindigkeit zur Inkonstanz neigt, daß sie zahlreiche Obertöne produzieren und daß ihre Töne von mehr oder weniger starken Geräuschen begleitet werden. Letztere sind insofern besonders unerwünscht, als die tiefsten Töne wegen ihrer großen Schwäche so wie so die vollste Aufmerksamkeit des Beobachters erfordern. Immerhin ist es Abraham und mir[2]), freilich erst nach einiger Übung, gelungen, an Seebeckschen Scheiben Unterbrechungstöne bis zu 16 Schwingungen hinunter zu hören.

Die Töne der Saiten sind reiner und weicher. Chladni verkürzte eine gespannte Saite derartig, daß sie anfangs 2 (sichtbare und zählbare), dann 4, dann 8 und schließlich 16 Schwingungen in der Sekunde machte, womit ungefähr die untere Tongrenze erreicht war. Biot kam durch sukzessiv zunehmende Spannung einer Saite von gleichbleibender Länge zu dem nämlichen Resultate. Indessen sind auch die Saiten bekanntlich nichts weniger als frei von harmonischen Obertönen. Diese aber, und zwar gerade die Oktave, Duodezime und Doppeloktave des Grundtones, neigen, wie wir seit den ausgezeichneten Untersuchungen C. Stumpfs[3]) hierüber wissen, derartig zur Verschmelzung mit dem Grundtone und miteinander, daß selbst ein musikalisch bestens geschultes Ohr schwerlich zu bestimmen imstande sein dürfte, ob die von einer Tonquelle mit der Schwingungszahl 16 herrührende Tonempfindung dem Grundtone oder dem unanalysierbaren Verschmelzungsprodukte aus Grundton und Obertönen entspricht, oder ob nicht vielleicht überhaupt bloß die Summe der Obertöne allein gehört wird, zumal da auch die Tonhöhenbeurteilung in dieser Region sehr mangelhaft ist. Zu Ungunsten des Grundtones kommt ferner der Umstand hinzu, daß im Gegensatz zur mittleren und hohen Tonlage bei Klängen von großer Tiefe die Obertöne nach Beobachtungen, die Helmholtz an seiner Doppelsirene gemacht hat[4]), den Grundton an Stärke übertreffen und daher leicht verdecken können.

Saiten, welche in ihrer Mitte ein schwereres Metallstück tragen, geben einen Klang, der aus einer Anzahl zueinander nicht harmonischer Teiltöne besteht. Der Grundton ist durch ein Intervall von mehreren Oktaven von

1) Über die Grenzen der Tonwahrnehmung; Jena, 1876; Kap. I: Die tiefsten Töne.

2) Karl L. Schaefer, Die Bestimmung der unteren Hörgrenze; Zeitschrift f. Psychologie u. Physiologie d. Sinnesorgane, Bd. 21, S. 170ff., 1899.

3) Beiträge zur Akustik u. Musikwissenschaft, Bd. 1, S. 36, 1898 (daselbst auch die ältere Literatur).

4) Lehre v. d. Tonempfindungen, 5. Ausgabe, S. 291.

den nächsten Obertönen getrennt und infolge dessen kaum mit denselben zu verwechseln; außerdem verklingen die höheren Töne relativ schnell. Helmholtz spannte eine auf diese Weise von den störenden Obertönen befreite messingene Klaviersaite über einen Resonanzkasten, welcher nur eine, mit dem Ohre durch eine Röhre verbundene Öffnung hatte, und berichtet über seine damit angestellten Versuche Folgendes[1]): „Die Töne einer Saite von gewöhnlicher Höhe sind unter diesen Umständen von unerträglicher Stärke. Dagegen rief schon das D_1 von 37 Schwingungen nur noch eine sehr schwache Tonempfindung hervor, und auch diese hatte etwas Knarrendes, was darauf schließen läßt, daß das Ohr auch hier anfing, die einzelnen Stöße trotz ihrer regelmäßigen Form einzeln zu empfinden. Bei B_2 (34 Schwingungen) war kaum noch etwas zu hören."

Dieses Verfahren von Helmholtz ist meines Wissens das einzige, durch welches die harmonischen Obertöne tiefster Grundtöne bisher beseitigt worden sind. Preyer erhebt indessen hiergegen den Einwand, daß die Schwingungen der Saite bei größerer Stärke vielleicht doch noch tiefere hörbare Töne ergeben haben würden. In der Tat muß man, worauf übrigens Helmholtz selbst schon ausdrücklich hingewiesen hat[2]), in der untersten Tonregion sehr starke Erschütterungen des Trommelfelles hervorrufen, um noch eine Tonempfindung auszulösen, da die Erregbarkeit des Cortischen Organes sich offenbar mit abnehmender Schwingungszahl immer mehr verringert.

Die weiten gedeckten Pfeifen der Orgel geben bekanntlich sehr kräftige Grundtöne mit nur schwachen Obertönen; ganz obertonfrei sind sie aber eben auch nicht. Helmholtz, der sie mit Bezug auf die Bestimmung der unteren Hörgrenze „wohl die zweckmäßigsten unter den bisher angewendeten Instrumenten" nennt, sagt[3]) von der Subkontra-Oktave der Orgel: „In der oberen Hälfte der zweiunddreißigfüßigen Oktave wird die Empfindung der einzelnen Luftstöße immer deutlicher, der kontinuierliche Teil der Empfindung, den man noch mit einer Tonempfindung vergleichen könnte, immer schwächer, und in der tieferen Hälfte der zweiunddreißigfüßigen Oktave hört man wohl eigentlich nichts mehr als die einzelnen Luftstöße, oder wenn man noch etwas anderes hört, so können es wohl nur schwache Obertöne sein, von denen auch die Klänge der gedackten Pfeifen nicht ganz frei sind."

Preyer verwendete zu seiner eigenen Untersuchung über die untere Tongrenze[4]) metallene Zungen von großer und mit abnehmender Schwingungszahl wachsender Amplitude in der ausgesprochenen Absicht, möglichst kräftige Grundtöne zu erzielen. Diese Zungen waren in dem bereits früher[5]) erwähnten „Grundtöne-Apparat" vereinigt. Preyer sowie seine Versuchspersonen beobachteten in der Weise, daß man die gerade gewählte Zunge ausklingen ließ und die Ohrmuschel in dem Augenblicke, wo alles Dröhnen erlosch, fest an die Holzwand des Kastens legte. Die am besten Hörenden vernahmen dabei bis zu 16 Schwingungen hinab vollkommen deutlich einen eigentümlichen ganz tiefen summenden Ton. Leider sind Preyers

1) Lehre v. d. Tonempfindungen, 5. Ausgabe, S. 294.
2) Ebenda, S. 293.
3) Ebenda, S. 293.
4) A. a. O. S. 7ff.
5) S. oben S. 266.

Argumente dafür, daß auf diese Weise wirklich der reine Grundton gehört werde, ganz und gar nicht stichhaltig. Durch die hierauf bezügliche Bemerkung von Helmholtz[1]), er finde durch die Aussage des Ohres allein, wenn nicht durch Schwebungszählungen die Angaben kontrolliert seien, seine Zweifel nicht ganz beruhigt, sah sich Preyer veranlaßt, einen zweiten Besitzer des Grundtöne-Apparates, Herrn A. J. Ellis in London, zur Vornahme solcher Schwebungsversuche aufzufordern. Der genannte Beobachter konstatierte[2]) daraufhin, daß die Zungen mit den Schwingungszahlen 21 und 25 ebenso wie 20 und 24, 19 und 23, 17 und 21, 16 und 20 tatsächlich je vier Schwebungen miteinander ergaben, wie es der Fall sein mußte, wenn nicht bloß Obertöne statt der Grundtöne vernehmbar waren. Bei 15 plus 19 waren bereits die vier Schwebungen nur noch schwer zu hören, und der Zusammenklang der beiden Zungen 15 und 17 lieferte an Stelle der zwei Schwebungen der Grundtöne die vier Schwebungen der beiden ersten Obertöne 30 und 34.

In der Ohrenheilkunde benutzt man gegenwärtig so gut wie ausschließlich die Bezold-Edelmannschen Laufgewichtgabeln[3]) zur Bestimmung der unteren Hörgrenze. Auch diesen Instrumenten ist der Übelstand eigen, daß ihre Grundtöne von harmonischen Obertönen begleitet werden. Dieselben entstehen[4]) in der Luft[5]). Von ihrer Existenz kann man sich leicht durch Schwebungsversuche überzeugen. So hörte ich z. B. gelegentlich beim Zusammenklang zweier Gabeln, von denen die eine 24, die andere 26 Schwingungen machte, gleichzeitig Schwebungen von verschiedener Frequenz, was allein auf der Mitwirkung von Obertönen beruhen konnte. Da die tiefsten Edelmannschen Laufgewichtgabeln so schwach tönen, daß sie bloß in unmittelbarer Nähe des Ohres hörbar sind, ist nicht daran zu denken, etwa die Obertöne durch zwischengeschaltete Interferenzröhren zu vernichten. Auch eine Verstärkung der Grundtöne durch Resonanz zu Ungunsten der Obertöne erweist sich in der tiefsten Tonregion als unmöglich, wie aus früheren Versuchen von mir hervorgeht, über welche ich in meiner Abhandlung „Ein kontinuierlicher Resonatoren-Apparat“[6]) Nachstehendes mitgeteilt habe: „Das Physiologische Laboratorium der Berliner Charité-Ohrenklinik besitzt eine Serie hölzerner gedeckter Orgelpfeifen, die bis zum Kontra-*E* hinabreicht. Diese Pfeifen können auch als Resonatoren dienen, wenn man, statt sie anzublasen, eine Edelmannsche Stimmgabel von entsprechender Tonhöhe über die Maulöffnung hält. Die Resonanzfähigkeit erlischt indessen bereits bei G_1. Die Verstärkung, die dieser Ton erfährt, kann man höchstens noch als einen schwachen Hauch bezeichnen. Schon bei A_1 ist die Intensitätszunahme des Grundtones nur noch sehr gering. Viel deutlicher hört man den dritten und namentlich den fünften Teilton heraus. Hält man

1) Lehre v. d. Tonempfindungen, 5. Ausgabe, S. 295 Anmerkung.

2) Preyer, Akustische Untersuchungen; Jena 1879; Kap. I: Tiefste Töne ohne Obertöne, S. 6f.

3) Über die Appunnschen Lamellen für tiefste Töne s. oben S. 271.

4) S. oben S. 238.

5) Schon aus diesem Grunde kann man nicht, wie Bezold (Zeitschr. f. Psychologie u. Physiologie d. Sinnesorgane, Bd. 13, S. 162) wollte, aus der anscheinenden Sinnsform einer von der Gabel selbst aufgezeichneten Schwingungskurve auf den Mangel von Obertönen schließen.

6) Passows und Schaefers Beiträge z. Anat. usw. des Ohres usw., Bd. 3, S. 135. 1910.

die diesen beiden Obertönen entsprechenden Gabeln über das Maul der Pfeife, so werden sie denn auch sehr viel mehr verstärkt als der Ton A_1. Überhaupt finde ich es bei den ganz tiefen Edelmannschen Gabeln, wenn man ihren Klang verstärken will, wirksamer, sie auf eine Tischplatte zu setzen, als sie vor eine Resonanzröhre zu bringen. Freilich kommt auch die Resonanz des Tisches überwiegend den Obertönen zugute, die man gelegentlich bis zum fünften Teiltone hören kann, während die Steigerung der Stärke des Grundtones zweifelhaft bleibt."

Da man somit die Obertöne der Edelmannschen Laufgewichtgabeln bei der Bestimmung der unteren Hörgrenze unabweislich mit in den Kauf nehmen muß, und das Ohr selbst in bezug auf Klanganalyse wie auf Tonhöhenunterscheidung hier ganz versagt, so bedeutet, streng wissenschaftlich genommen, die Hörbarkeit einer vor das Ohr gehaltenen Gabel von beispielsweise 16 Schwingungen lediglich, daß der Klang der betreffenden Gabel, und nicht etwa, daß der Grundton 16 mit Sicherheit perzipiert wird.[1]) Für die praktischen Zwecke der Otiatrie wird es ja aber auch meistens genügen, den jeweils tiefsten noch hörbaren „Klang" ohne spezielle Rücksicht auf den Grundton festzustellen, sofern man nur zu vergleichenden Prüfungen stets ein und dasselbe Instrument oder wenigstens ein und dieselbe Gattung von Tonquellen benutzt.

2. Höchste Töne und Bestimmung der oberen Hörgrenze.

Bei Versuchen mit den höchsten hörbaren Tönen spielen die Obertöne keine Rolle, da sie der Natur der Sache nach über die Grenze hinausfallen und mithin unvernehmbar sind. Dahingegen bieten hier die technischen Verhältnisse gewisse größere Schwierigkeiten als am unteren Ende der Tonreihe.

Die ersten, auf genauen Messungen beruhenden Beobachtungen über die obere Hörgrenze hat Savart angestellt.[2]) Er verwendete dazu kurze Stäbe, die teils in longitudinale, teils in transversale Schwingungen versetzt wurden, und vor allem seine Zahnräder. Ein Rad von 24 cm Durchmesser und 360 Zähnen gab Töne über 3000—4000 v. d. nur noch schwach und unrein. Ein Rad von 48 cm Durchmesser und 400 Zähnen lieferte reine Töne bis zu 10000 v. d.; dann wurden die Töne wieder schwächer und hörten bei 12000 bis 15000 auf, wahrnehmbar zu sein. Schließlich wurde ein Rad von 82 cm Durchmesser mit 720 Zähnen benutzt. Nun hörte man noch Töne selbst bei 24000 Schlägen in der Sekunde, und obgleich die Stärke des Tones, die bei 12000 bis 15000 noch sehr groß war, alsdann anfing, bedeutend abzunehmen, so ließ sich doch nicht sagen, bei welchem Punkte die Tonempfindung vollständig aufgehört haben würde, weil die Umdrehungsgeschwindigkeit nicht weiter erhöht werden konnte.

F. A. Schulze hat vor einigen Jahren diese Savartschen Versuche wiederholt.[3]) Er experimentierte mit fünf verschiedenen Zahnrädern. Drei von

1) Vgl. hierzu meine kritischen Bemerkungen gegen Bezold in der Zeitschrift f. Psychologie u. Physiologie der Sinnesorgane, Bd. 21, S. 164f., 1899.

2) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 20, S. 290ff., 1830.

3) Sitzungsber. d. Gesellsch. z. Beförderung d. ges. Naturwiss. zu Marburg, Nr. 5, 4. Aug. 1910.

ihnen, auf einer gemeinsamen Achse befestigt, hatten einen Durchmesser von 10 cm. Die Anzahl der Zähne war 325 resp. 476 und 691. Das vierte Rad hatte 20 cm Durchmesser und 955 Zähne. Der Durchmesser des fünften betrug 80 cm und die Zahnzahl 1784. Die Räder waren auf einer Drehbank befestigt, welche elektrischen Antrieb hatte. Die mittelst eines Tourenzählers bestimmbare Umlaufsgeschwindigkeit konnte durch Veränderung des Anlaßwiderstandes beliebig variiert werden, und die Töne selbst wurden dadurch erzeugt, daß man ein dünnes Holzbrettchen oder eine Scheibe aus starkem Kartonpapier am rotierenden Zahnkranze schleifen ließ. Infolge der mannigfachen Nebengeräusche, die bei dieser Methode auftreten, war die Genauigkeit nicht so groß wie bei den meisten anderen. Immerhin ließ sich aber zuverlässig feststellen, daß jede Tonempfindung aufhörte, wenn mehr als 16000 bis 17000 Zähne pro Sekunde das Kartenblatt passierten, während unterhalb dieser Grenze stets ein Ton gehört wurde. Bei dem fünften Zahnrade, welches aus einer Pappscheibe mit gezähntem Messingrande bestand, erschien bei einer Erhöhung des eigentlichen Tones über ca. 10000 v. d. neben diesem noch ein zweiter, wesentlich tieferer, der bei weiterer Zunahme der Drehgeschwindigkeit ebenfalls höher sowie lauter wurde und schließlich den anderen verdeckte.

Schulze hält es nicht für ausgeschlossen, daß auch Savart sich durch solche Nebentöne habe täuschen lassen. Noch schärfer kritisiert Hegener[1]) die Savartschen Versuche, indem er darüber sagt: „Es fehlt hier vor allem der Nachweis, daß ein Ton, dessen Schwingungszahl mit der Zahl der vorbeistreichenden Zähne übereinstimmt, wirklich produziert wurde. Es ist durchaus unwahrscheinlich, daß ein Körper von so geringer Elastizität, wie ein Kartenblatt, und einer Form, die so großen Luftwiderstand leistet, tatsächlich 24000 mal in der Sekunde zurückfedert, so daß er von jedem Zahn einen Impuls erhält. Viel wahrscheinlicher handelt es sich hier um eine Art von Reibungstönen, wie sie Strouhal untersuchte. Es dürfte danach nicht die Zahl der Impulse, sondern vielleicht ein Eigenton des Kartenblattes die wesentliche Rolle spielen. Vielleicht handelt es sich auch nur um die Reibung des Zahnrades in der Luft, die an der Stelle, wo das Kartenblatt der abgeschleuderten Luft einen größeren Widerstand leistet, zu verstärkter Tonbildung führt."

W. Preyer[2]) hörte an einer großen Seebeckschen Sirene, einer kreisrunden Zinkplatte, an deren Peripherie 1024 Löcher gebohrt waren, bei etwa 24000 Stößen pro Sekunde neben dem Reibungsgeräusch der Luft noch einen ganz leisen sehr hohen Ton, wenn er mit großer Aufmerksamkeit beobachtete. Viele seiner Versuchspersonen vernahmen aber hierbei nur das Blasen. Bei geringerer Löcherzahl wurden Töne von mehr als 16000 Schwingungen vollkommen deutlich und nicht unangenehm empfunden.

Pauchon[3]) benutzte eine kräftige Dampfsirene nach Cagniard de La Tour. Wechselte der Dampfdruck im Windkessel von 0,5 bis 1,5 Atmosphären, so lag die Grenze zwischen 24000 und 30000 Schwingungen, während bei Anwendung einer Gegenplatte die Tonhöhe unter einem Druck

1) Verhandlungen d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. in Dresden 1910; Jena, Fischer, 1910, S. 99f.

2) Über d. Grenzen d. Tonwahrnehmung; Jena 1876; Kap. II: Die höchsten Töne, S. 18f.

3) Philosoph. Magazine, 5. Serie, Vol. XV, p. 371, 1883.

von 2,5 Atmosphären auf 36000 stieg, ohne daß damit die Hörgrenze erreicht war.

Rudolph Koenig[1]) gab ebenfalls den Löchersirenen den Vorzug vor den Zahnrädern. Die von ihm für die höchsten Töne konstruierte Scheibe hatte einen Durchmesser von 1 m bei einer Dicke von 1,5 mm und trug zehn Kreise von 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 640, 768 und 1024 Löchern, so daß in allen Fällen die Schwingungszahlen der höchsten Töne sich auch ohne Zählwerk durch die immer leicht festzustellende Höhe der tieferen bestimmen ließen. Da es sehr schwer ist, Scheiben von den angegebenen Dimensionen derartig eben herzustellen, daß ihre Ränder bei der Drehung ohne jede oszillierende Bewegung bleiben, empfiehlt Koenig, die Sirene auf dem Rotationsapparat zwischen zwei kräftige, ganz plane Holzplatten einzuspannen, so daß nur der Rand mit den 10 Löcherreihen hervorragt, wodurch die Oszillationen fast ganz beseitigt würden, was übrigens bei sehr großer Rotationsgeschwindigkeit schon die Zentrifugalkraft allein besorge. Vor allem macht Koenig aber darauf aufmerksam, daß man zur Erzeugung der höchsten Töne einen Anblasewind von hinreichender Stärke nötig hat. Seine Geschwindigkeit muß nämlich — was ja an sich selbstverständlich ist, aber leicht übersehen werden kann — so groß sein, daß er trotz der äußerst kurzen Zeit, während welcher jede Öffnung die Anblaseröhre passiert, die ganze Länge des Lochkanals, die gleich der Dicke der Scheibe ist, zu durchdringen und auf der anderen Seite noch einen als Tonimpuls wirksamen Luftstoß zu erzeugen vermag.

Hegener[2]) hält seine vorhin angeführten Einwände gegen Savart für ebenso gültig gegenüber Preyers Sirenenscheibenversuch. Namentlich erscheint es ihm fraglich, ob die eben erwähnte Forderung Koenigs in bezug auf die Windstärke erfüllt war. Pauchon könne man freilich diesen letzteren Einwurf kaum machen, es wäre aber doch mehr als wahrscheinlich, daß dessen Sirene tiefere Reibungstöne erzeugt habe, abgesehen davon, daß bei dem Entweichen so enormer Dampfmassen zischende Nebengeräusche nicht zu vermeiden seien.

Jedenfalls wird man gut tun, bei künftigen Bestimmungen der oberen physiologischen Tongrenze mittelst Sirenen eine Kontrolle der Schwingungszahl des höchsten hörbaren Tones anzustreben. Wesentlich günstiger steht es in dieser Beziehung mit den Koenigschen Klangstäben, die zu irgend erheblichen Zweifeln hinsichtlich der Tonhöhe keinen Anlaß geben. Eine Serie von Klangstäben besteht aus diversen Stahlzylindern, die aus einer und derselben Stahlstange geschnitten und daher von genau gleicher Beschaffenheit sind, aber verschiedene, mit wachsender Schwingungszahl abnehmende Länge besitzen. Die Stäbe sind an beiden Seiten in einem Abstande vom Ende, der gleich $^1/_5$ der ganzen Stablänge ist, mit einer eingedrehten Rille versehen und werden mit dieser Rille entweder, wie Fig. 81 zeigt, auf konvergent gerichtete Kautschukröhren gelegt oder nach dem Muster der Fig. 82 an Schnüren aufgehängt. Mit einem harten Klöppel in

1) Über die höchsten hörbaren und unhörbaren Töne etc.; Annalen d. Phys. u. Chem., N. F., Bd. 69, S. 733f., 1899.

2) A. a. O.

seiner Mitte senkrecht zur Längsaehse angeschlagen, gibt jeder dieser Stäbe einen Transversalton, indem in der Mitte und an den Enden Schwingungsbäuche entstehen und die Rillenquerschnitte Knoten bilden. Die Schwingungszahlen (N) dieser Töne verhalten sieh dabei der Theorie naeh umgekehrt wie die Quadrate der Stablängen (L), so daß, wenn etwa die Sehwingungszahl des längsten bekannt ist, die übrigen Stäbe in beliebigen Intervallen hierzu abgestimmt werden können, indem man ihnen einfaeh die der Gleiehung $L : L_1 = \sqrt{N_1} : \sqrt{N}$ entspreehende Länge gibt. In Wirkliehkeit zeigt sich allerdings, wenn man die Stäbe naeh der Differenztonmethode oder mittelst Kundtscher Staubfiguren prüft, daß ihre Schwingungszahlen mit zunehmender Höhe mehr und mehr hinter den berechneten Werten zurückbleiben. Diese Verstimmung beträgt indessen bei einer von c^5 ausgehenden Serie in der Gegend der oberen Hörgrenze immer noeh weniger als einen Ganzton und läßt sich ja überdies dureh eine entspreehende Verkürzung des Stabes unter experimenteller Kontrolle der Tonhöhenänderung ausgleichen [1]). Koenig empfahl in dem Katalog seines Pariser Instituts von

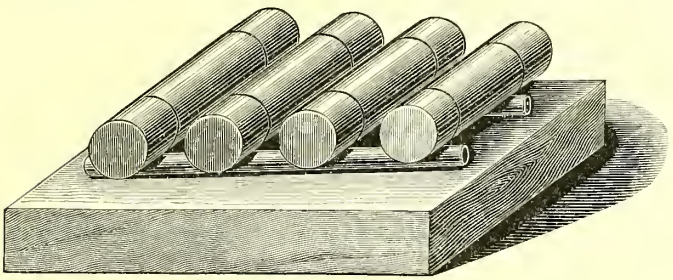


Fig. 81.

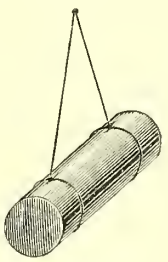


Fig. 82.

1889 eine Reihe von 22 Klangstäben für die Töne von c^5 bis c^8. Bis c^7 sollten die Zylinder beim Ansehlagen mittelst des beigegebenen Stahlhammers in ihrem Rahmen hängen bleiben, von d^7 bis c^8 jedoeh an den beiden Fäden frei und unmittelbar vor das Ohr gehalten werden. Koenigs Abstimmung seiner Tonmittel war stets durehaus zuverlässig. Heutigen Tages in irgendeinem beliebigen Instrumentengeschäfte gekaufte „Koenigsche Klangstäbe“ benutze man dagegen zu wissensehaftlichen Zweeken nicht ohne vollgültige Garantie für die Genauigkeit der Sehwingungszahlen.

Aueh Stimmgabeln lassen sich für die Feststellung der oberen Hörgrenze verwenden. Man muß sie aber, wie R. Koenig es getan hat [2]), mit Hilfe von Differenztönen oder von Kundtsehen Röhren stimmen, da die Versuche früherer Meehaniker, das bloße musikalische Gehör hierfür zu benutzen, zu eklatanten Mißerfolgen geführt haben [3]). Naeh dem Tode Koenigs und dem

1) Vgl. hierzu R. Koenig, Über die höchsten hörbaren und unhörbaren Töne etc.; Annalen d. Phys. u. Chem., N. F., Bd. 69, S. 722ff., 1899. (Daselbst auch Näheres über die Ursache und Zahl der die Stabtöne begleitenden Schwebungen.)

2) Ebenda, S. 626ff.

3) Eine referierende Zusammenstellung der hierüber entscheidenden Arbeiten habe ich in der Zeitschrift f. Psychologie und Physiologie d. Sinnesorg., Bd. 21, S. 141 u. Bd. 22, S. 229 veröffentlicht.

Erlöschen seiner Firma dürfte es gegenwärtig freilich schwierig sein, eine exakt geeichte Serie von Gabeln der höchsten Region zu erhalten. Auch erfordert bei solchen die Technik der Tonerzeugung durch das Anstreichen mittelst des Bogens eine große Übung.

Als Ersatz für höchste Stimmgabeln hat Melde seine Stimmplatten empfohlen[1]). Diese unterscheiden sich von den gewöhnlichen Chladnischen Klangscheiben vorwiegend durch ihre Dicke. Sie werden in runder oder quadratischer Form hergestellt, und zwar am besten aus Gußstahl. Fig. 83 gibt eine leichtverständliche Darstellung davon in natürlicher Größe. In a ist die Platte von oben zu sehen, in b von der Seite. Der Stiel ist zum Einschrauben in einen massiven Holzklotz eingerichtet. Die Tonerregung geschieht nach der Methode von Antolik durch Hinundherziehen eines befeuchteten Glasstabes in der Auskerbung des Korkstückchens α[2]). Ob der Ton wirklich entsteht oder nicht, läßt sich bei den Stimmplatten — und

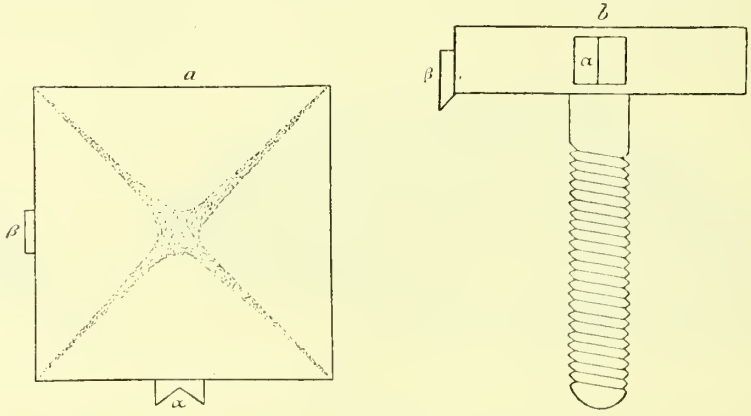


Fig. 83.

dies bezeichnet Melde mit Recht als einen großen Vorzug vor den Gabeln — optisch erkennen, indem man etwas ganz reinen und trockenen Quarzsand auf die Platte streut: Im Moment der Tonbildung erscheint dann plötzlich haarscharf, wie hervorgezaubert, die Chladnische Knotenfigur, das Kreuz durch die Ecken (Fig. 83a). Die Höhe des Tones einer jeden Platte wird nach der schon[3]) beschriebenen Resonanzmethode bestimmt, wobei das Korkstückchen β zum Aufstützen der Platte auf den Resonanzstab dient. Melde kam mit diesem Verfahren bei den Platten bis zu ca. 28000 Schwingungen hinauf, während es sich, auf Stimmgabeln angewendet, nur bis etwa 17000 v. d. brauchbar erwies. Annähernd läßt sich übrigens auch die Tonhöhe der Meldeschen Platten berechnen mit Hilfe einer schon von Chladni angegebenen Formel, wonach die Schwingungszahlen N und N_1 zweier Schei-

1) Annalen d. Physik u. Chemie, N. F., Bd. 66, S. 767, 1898. — Die Stimmplatten sind jetzt zu beziehen aus dem Physikalisch-Mechanischen Institut von Edelmann in München, Nymphenburgerstr. 82.

2) Vgl. oben S. 239.

3) S. 317.

ben von demselben Material, derselben Gestalt und derselben Knotenlinienform mit den Längen l und l_1 und mit den Dicken d und d_1 in folgender Beziehung stehen: $N : N_1 = d l_1^2 : d_1 l^2$; allerdings setzt diese Formel voraus, daß die Tonhöhe der einen Platte bereits bekannt ist.

Einige Erfahrungen über Orgelpfeifen höchster Höhe hat R. Koenig[1]) mitgeteilt. Er konstruierte eine Reihe von 19 offenen Orgelpfeifen für die Töne der diatonischen Tonleiter von c^5 bis g^7, deren tiefste eine Länge von 33,5 bei 4 mm Tiefe hatte, und deren höchste, g^7, 5 mm lang und 0,9 mm tief war. Diese Pfeifen, sagt Koenig, „tönen am besten, wenn sie von c^5 bis e^6 unter einem Wasserdrucke von 80 mm angeblasen werden, von e^6 bis a^6 unter einem von 100 mm und von a^6 bis g^7 unter einem von 120 mm. Ihre Töne sind in sehr hohem Grade von der Stärke des Anblasens abhängig, so daß z. B. der Ton der Pfeife c^5 beim Anblasen unter fortschreitendem Wasserdrucke von 35 bis zu 120 mm um ungefähr 150 Schwingungen, also etwa um einen halben Ton stieg. Infolgedessen reichen schon sehr geringe Druckveränderungen während des Anblasens hin, die Töne dieser Pfeifen beständig höher und tiefer werden zu lassen, wie das in auffälliger Weise sich durch die großen Schwankungen der Tonhöhe der Stoßtöne zu erkennen gibt, welche sich bei den Intervallen der Pfeifen von c^5 bis a^5 gut beobachten lassen." Obwohl Koenig eine präzise Abstimmung dieser Pfeifen bis g^7 nicht vorgenommen hat — sie waren nur nach den empirischen Regeln der Orgelbaukunst verfertigt — so liegt doch kein Grund vor, an der leidlichen Genauigkeit der Tonhöhen zu zweifeln.

Man könnte demnach auch mit Orgelpfeifen Bestimmungen der oberen Hörgrenze vornehmen, meistens wird man ihnen aber wohl die Galtonpfeife vorziehen, allein schon wegen der Kontinuität der Tonhöhenfolge. Freilich muß man alsdann, wie bereits früher[2]) nachdrücklich hervorgehoben und ausführlich begründet wurde, ein für alle Mal auf das Gummi-Handgebläse verzichten und die Pfeife mit konstantem, hinreichend starkem Winddruck anblasen[3]).

In einer wertvollen Untersuchung über die hier in Betracht kommenden Verhältnisse hat Hegener gezeigt[4]), daß eine Edelmannsche Grenzpfeife, wenn man sie bei einer Maulweite von 0,88 und irgendeiner Pfeifenlumenlänge zwischen 4,0 und 1,0 mit einem Druck anbläst, der sukzessive von 4 bis 40 cm Wasser gesteigert wird, zunächst einen (nicht ganz regelmäßig) mit dem Druck sich erhöhenden Ton liefert, und daß die Schwingungszahl erst von der Druckgröße 30 an merklich konstant wird. Bei einem Druck zwischen 30 und 40 cm Wasser ergab die

Pfeifenlänge	4,0	einen	Ton	von	rund	15 000 v. d.
»	3,0	»	»	»	»	19 000 » »
»	2,0	»	»	»	»	23 000 » »
»	1,5	»	»	»	»	26 000 » »
»	1,0	»	»	»	»	30 000 » »

1) Über die höchsten hörbaren und unhörbaren Töne etc.; Annalen d. Phys. u. Chem., N. F., Bd. 69, S. 731 f., 1899.

2) S. 232 ff.

3) Über die hierzu geeignete Methodik vgl. S. 259 ff.

4) Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. etc. des Ohres etc., Bd. 1, S. 321 ff., 1908.

Hiernach wird eine Bestimmung der oberen Hörgrenze mittelst der Galtonpfeife, die allen Ansprüchen an wissenschaftliche Exaktheit genügen soll, anzustellen sein, wie folgt. Die Pfeife wird mit einer Preßluftflasche durch einen Schlauch verbunden, in den ein Präzisionshahn zwecks Feineinstellung des Druckes auf einen konstanten Wert von 30 bis 40 cm Wasser und außerdem kurz vor der Pfeife ein Manometer eingeschaltet ist. Alsdann wird durch Hinundherschrauben des Pfeifenstempels zunächst ungefähr und darauf durch mehrfache Wiederholung möglichst genau die Grenze festgestellt, an welcher der Ton bei der kontinuierlichen Erhöhung eben verschwindet, beziehungsweise bei der Vertiefung eben auftaucht. Schließlich wird im unmittelbaren Anschluß hieran die Schwingungszahl des Grenztones nach einer der oben schon beschriebenen Methoden ermittelt. Die bequemere Benutzung einer Eichungstabelle ist nur erlaubt, wenn dieselbe korrekt hergestellt ist und unter stets genau gleichen Versuchsbedingungen experimentiert wird.

Das Anblasen der Galtonpfeife mittelst konstanten Druckes ergibt viel klarere Töne als der Gummiballon. Auch das längere Andauern der Tonempfindung ist entschieden ein Vorteil, hat doch R. Koenig sogar gelegentlich behauptet, daß die obere Hörgrenze für anhaltende Töne höher liege als für momentan verklingende. Das an sich unvermeidliche Blasegeräusch kann die Versuchsperson dadurch ausschalten, daß sie die Finger in die

Fig. 84.

Ohren steckt. Die sehr hohen Töne durchdringen jeden Verschluß des Gehörganges bis nahe zur Grenze hinauf.

Wie schon früher Savart und Pauchon stellte F. A. Schulze[1]) vor einigen Jahren Versuche über die höchsten hörbaren Töne mit Longitudinalschwingungen dünner Drähte an, woraus sich die Konstruktion seines Monochords zur Bestimmung der oberen Hörgrenze entwickelte[2]). Der Apparat (Fig. 84), zu beziehen von Herrn Paul Görs, Mechaniker am Physikalischen Institut der Universität Marburg[3]), besteht aus einem Grundbrett mit zwei endständigen Klemmen, zwischen denen ein Stahl- oder Silberdraht ausgespannt ist. Auf dem Grundbrett ist längs einer Skala ein Schlitten verschiebbar, der eine dritte Klemme trägt, so daß verschiedene Längen der Saite abgegrenzt werden können. Die Tonerzeugung geschieht durch Anreiben mittelst eines kleinen mit Kolophoniumpulver bestäubten Tuchläppchens in der Längsrichtung des Drahtes. Der dadurch hervorgerufene Longitudinalton ist abhängig von dem Elastizitätsmodulus, dem spezifischen Gewicht und der Länge der Saite, wird dagegen von Spannung und Temperatur praktisch nicht beeinflußt: die Schwingungszahlen der Longitudinal-

1) Sitzungsber. d. Gesellsch. z. Beförderung d. ges. Naturwiss. zu Marburg, Nr. 8; 13. Nov. 1907. Vgl. auch F. A. Schulze, Die obere Hörgrenze und ihre exacte Bestimmung; Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. etc. des Ohres etc., Bd. 1, S. 134, 1908.

2) Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 56, S. 167.

3) Preis 22 bis 25 Mark.

grundtöne des Monochords verhalten sich zueinander umgekehrt wie die Saitenlängen. Mithin beschränkt sich die Eichung des Instrumentes in einfachster Weise auf die exakte Tonhöhenbestimmung einer einzigen Saitenlänge, etwa derjenigen, die dem tiefsten Tone entspricht. Als solcher kann je nach Wunsch des Bestellers c^5, g^5 oder c^6 gewählt werden[1]). Von dieser Grenze aufwärts läßt sich dann mit Hilfe des Monochords jede Tonhöhe bis weit über die Hörgrenze hinaus erzeugen. Die Töne sind schwächer als die Galtontöne; trotzdem erhält man nicht selten mit dem Monochord eine höhere Grenze als mit der Pfeife.

Das Monochord von Struycken[2]) ist etwas später als das Schulzesche in das physiologische und otiatrische Instrumentarium eingeführt worden, erfreut sich aber zunehmender Beliebtheit. Die Saite ist hier über eine linealartige Metallschiene an Stelle des Schulzeschen Grundbrettes gespannt, welche unten einen gebogenen Griff zum Anfassen und vorn einen aufwärts gekrümmten Schnabel hat, mittelst dessen das Instrument zwecks Prüfung der Knochenleitung gegen den Schädel gedrückt werden kann, während sich am Hinterende eine Schraube zum Spannen der Saite befindet. Die Töne werden durch Anstreichen des zwischen dem Schnabel und dem verschieblichen Stege („Stimmklötzchen") gelegenen Saitenstückes in der Längsrichtung erzeugt. Die jeweilige Saitenlänge ist an der Zentimeter- resp. Millimeterskala der Schiene ablesbar. Der Bequemlichkeit halber sind für die diatonischen C-dur-Leitertöne von g^5 bis g^7 besondere Marken angebracht, auf welche immer die Vorderkante des Stimmklötzchens einzustellen ist. In gleicher Weise sind auf der Schienenoberkante die Tausender der Schwingungszahlen durch Einstellungsstriche und römische Ziffern markiert, so daß man unmittelbar die Saitenlänge für 6000, 7000 usw. bis 25000 Schwingungen fixieren kann. Da die Schwingungszahlen der Longitudinaltöne der Saite sich umgekehrt wie die zugehörigen Längen verhalten, so ist das Produkt aus Schwingungszahl und Länge für alle Einstellungen konstant. Der Zahlenwert dieses Produktes ist am Grunde des Schnabels in die Schiene eingeschlagen. Dividiert man in diese Zahl mit einer gegebenen Länge der Saite, so erhält man genau die korrespondierende Schwingungszahl und umgekehrt. Meist wird man aber wohl, wenigstens bei otiatrischen Untersuchungen, mit der unmittelbaren Ablesung der Tonhöhe und einer eventuell ergänzenden Interpolation auskommen.

Soll die obere Hörgrenze für Luftleitung bestimmt werden, so wird die Spitze des vom Untersucher in die linke Hand genommenen Monochords frei vor den Gehörgang des zu Prüfenden gehalten; handelt es sich um die Kopfknochenleitung, so stützt man das Vorderende der Schiene, am besten nach Armierung mit dem beigegebenen Elfenbeinschuh, gegen den Warzenfortsatz[3]). Das Anreiben der Saite kann mit einem Tuchlappen und Kolo-

1) Hier wird oft der Grad der Handlichkeit den Ausschlag geben. Das Stahldrahtmonochord, beginnend mit c^5, ist 80 cm lang, das Monochord mit Silberdraht und g^5 als tiefstem Tone 30 cm.

2) S. hierzu Passows und Schaefers Beiträge z. Anat. etc. des Ohres etc., Bd. 3, S. 407ff., 1910.

3) Die am Kopfende der Saite angebrachte Schutzhülse dient hierbei dem Zweck, eine Berührung der Saite mit der Ohrmuschel oder den Haaren zu vermeiden.

phonium geschehen. Empfehlenswerter ist ein mit absolutem Alkohol oder Terpentin getränkter Watte- bezw. Gazebausch, den man mit den Fingern beim Reiben kräftig an die Saite drückt. Struycken selbst schreibt ein „Streichfläschchen" vor, das mit Tetrachlorkohlenstoff (unter Zusatz von etwas Lavendelöl) gefüllt und mit einem Filzplättchen verschlossen ist, welches letztere durch den Kontakt mit der Flüssigkeit immer genügend durchtränkt bleibt und unter sanftem Druck nicht zu langsam auf der Saite hin und her gestrichen werden soll.

Ein besonderer Vorzug des Struyckenschen Monochords vor allen anderen Tonmitteln von höchster Höhe besteht eben darin, daß man nicht nur sehr bequem, sondern namentlich auch kontinuierlich die Knochenleitung von der Hörgrenze an bis zur Mitte der fünfgestrichenen Oktave herunter prüfen kann. Bisher benutzte man für die Knochenleitung im allgemeinen nur Stimmgabeln, etwa die Bezold-Edelmannsche Tonreihe, die aber oberhalb c^3, mindestens was die Kontinuität anlangt, mehr oder weniger vollständig versagten. Auch jetzt bleibt noch, wenn man zwecks kontinuierlicher Untersuchung der Knochenleitung in der tiefen Region die Laufgewichtgabeln und in der hohen die Longitudinaltöne des Monochords verwendet, eine mittlere Lücke, die ca. von c^3 bis f^3 reicht. Ich habe, teils um diese auszufüllen, teils um den Tonumfang des Monochords überhaupt zu vergrößern, vor einiger Zeit[1]) vorgeschlagen, auch die Transversaltöne der Saite auszunutzen, deren tiefster ungefähr gis^1 ist und deren höchster dem tiefsten Longitudinalton sehr nahe kommt.

Die Transversalschwingungen werden durch Anschlagen mit einem leicht federnden, keilförmig angeschärften, belederten Holzhammer oder durch Anstreichen mit einem kleinen Violinbogen erzeugt. Ersterer eignet sich mehr für größere, letzterer mehr für kurze Saitenlängen. Um die Reinheit und Stärke der durch Luftleitung dem Ohre zugeführten Transversaltöne zu erhöhen, setzt man das Monochord am besten während der Tonerzeugung mit dem Schnabel auf eine gut resonierende Tischplatte. (Auf Wunsch wird dem Instrument auch eine besondere „Klangplatte" beigegeben, die aber nicht ganz so wirksam ist.) Bei der Untersuchung der Kopfknochenleitung mittelst der Transversaltöne, wobei ja die Spitze des Monochords auf dem Warzenfortsatz der Versuchsperson ruht, kann man das Hinterende des Instruments an irgendeine Resonanzfläche anlehnen.

Zum Eichen bezw. Nachstimmen der Saite auf die Transversaltöne gebraucht man den Struyckenschen Spannungsmesser, und zwar in folgender Weise. Man stellt die vordere Kante des Stimmklötzchens auf den Teilstrich 40 der Schiene und befestigt den Spanner so auf dem Monochord, daß er mit dem oberen Haken auf der Saite genau über Teilstrich 20 hängt, während der untere Haken als Stützpunkt an der Unterkante der Schiene anliegt. Die Spannung wird dann durch Drehung der Schraube hinten am Monochord so lange verändert, bis beim Blick auf das in Augenhöhe gehaltene Instrument die Saite sich mit dem oberen roten Strich der Skala auf der

1) Karl L. Schaefer, Über eine Erweiterung der Anwendbarkeit des Struyckenschen Monochords; Passows und Schaefers Beiträge z. Anat. etc. des Ohres etc., Bd. 4, S. 375, 1911.

Elfenbeinplatte deckt[1]). Damit ist die gröbere Einstellung der Spannung erreicht. Zwecks Feineinstellung wird die Saite auf 43 cm Länge gebracht und dann die Spannung durch geringe Drehungen der Schraube noch so lange modifiziert, bis der Ton der Saite mit dem Ton der beigegebenen a^1-Gabel mit 435 v. d. im Einklang ist. Entspricht die Länge von 43 cm genau der Tonhöhe 435, so hat irgendeine andere Länge L die Schwingungszahl $N = \frac{435 \times 43}{L} = \frac{18705}{L}$, und umgekehrt gehört zu einem gegebenen N die Länge $L = \frac{18705}{N}$. Die Stimmung des Monochords auf Transversaltöne ist nie ganz mathematisch genau, doch sind die Abweichungen bei vorschriftsmäßiger Eichung praktisch meist so gut wie belanglos.

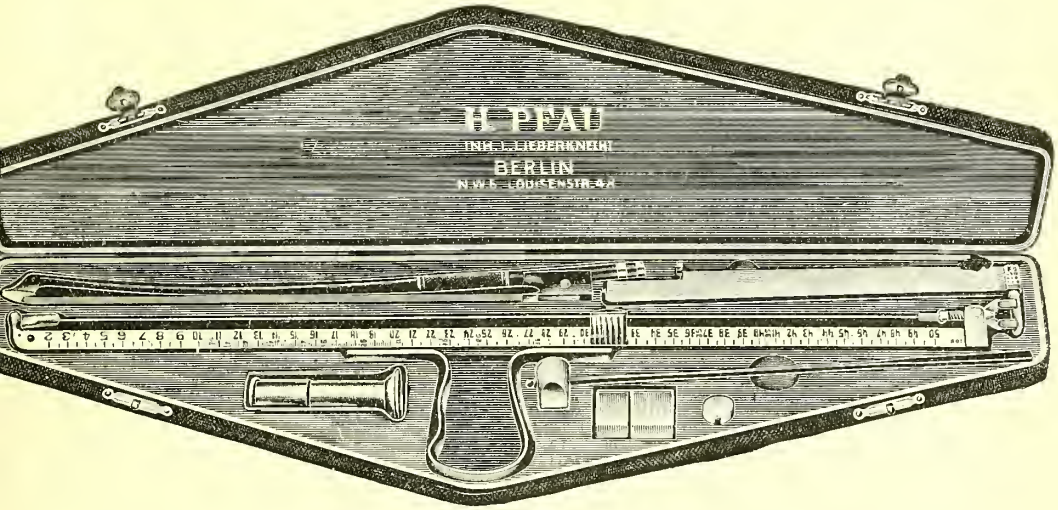


Fig. 85.

Fig. 85 gibt eine Abbildung des gesamten Instrumentariums[2]), welches in Kaliko-Etui zum Preise von 79,50 M. von der Firma H. Pfau, Berlin NW. 6, Luisenstr. 48, nebst Gebrauchsanweisung, Literatur und einer Tabelle der zusammengehörigen Schwingungszahlen und Saitenlängen für die Transversaltöne zu beziehen ist.

Wie schon erwähnt, hat Melde gelegentlich mit Recht hervorgehoben, daß in der Nähe der oberen Hörgrenze auch ein optischer Nachweis der regelrechten Tonbildung immer wünschenswert wäre. Einen solchen hat F. A. Schulze für die höchsten Longitudinaltöne des Monochords dadurch erbracht, daß er Papierreiterchen auf die Saite setzte, die beim Tönen leb-

1) Für die Longitudinaltöne ist der Spanner auf den Teilstrich 25 einzustellen, was einem spannenden Gewicht von 25 kg entspricht. Bei einer Spannungssteigerung über den unteren roten Strich hinaus ist ein Zerreißen der Saite zu erwarten.

2) Nur die a^1-Gabel ist nicht mitgezeichnet; rechts unten sieht man neben dem Elfenbeinschuh einen Behälter mit Kolophonium zum Einreiben des Bogens.

haft hin und her rutschten, meist entgegengesetzt der jeweiligen Anstrichrichtung. Hegener verwendete zu dem gleichen Zweck eine empfindliche Flamme.

3. Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen.

a) Bei aufeinanderfolgenden Tönen.

Bekanntlich können ganz hervorragend musikalisch veranlagte Personen Höhendifferenzen zweier aufeinanderfolgender Töne der mittleren Oktaven noch erkennen, wenn dieselben nur Bruchteile einer Schwingung betragen. Gegenüber einer derartigen Feinheit der Unterschiedsempfindlichkeit ist es natürlich unbedingt erforderlich, daß die Schwingungszahlendifferenz der zur Prüfung benutzten Tonquellen äußerst genau bestimmbar und während des Versuchs absolut konstant ist. In solchen Fällen kommen daher bloß Stimmgabeln, Zungen und etwa Saiten in Betracht, während Lippenpfeifen und Sirenen nur dort ausreichen, wo die Unterschiedsempfindlichkeit, wie bei sehr großer Höhe der verglichenen Töne oder mangelnder musikalischer Übung des Beobachters, erheblich geringer ist. Wesentlich ist ferner, daß die beiden auf ihre Differenz hin zu beurteilenden Töne möglichst gleiche Stärke sowie gleiche Färbung besitzen und frei von störenden Nebengeräuschen sind. Auch sollen die Pausen zwischen den zu vergleichenden Tönen bei einer Reihe von Versuchen gleichmäßig und recht kurz sein, wenigstens so kurz, daß die erste Tonhöhe noch deutlich im Gedächtnisse haftet, wenn die zweite gegeben wird.

Nach Preyers[1]) Angabe war Delezenne der erste, welcher Experimente über die Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit anstellte. Er benutzte hierzu eine metallene Saite, die zunächst durch einen mittleren Steg genau in zwei Hälften geteilt war. Wurde der Steg um einen Millimeter seitwärts verschoben, so bemerkten sehr geübte Ohren bereits einen Höhenunterschied der dadurch ungleich gewordenen beiden Saitenstücke. Die Tondifferenz kann man bei einem solchen Versuch aus den gemessenen Längen und der bekannten Schwingungszahl der ganzen Saite leicht berechnen. Noch besser dürfte es indessen sein, sie akustisch zu ermitteln, indem man die beiden eben merklich verschiedenen Töne nacheinander mit einem dritten, um einige Schwingungen abweichenden Tone, etwa einer Gabel, schweben läßt und durch Auszählung der Schwebungen die Schwingungszahlen feststellt; die Höhe des Vergleichstones braucht dabei nicht selbst genau bekannt zu sein, da sie ja bei der Subtraktion aus der Rechnung herausfällt.

Um Delezennes Verfahren auf verschiedene Regionen des Tonreiches anwenden zu können, müßte man die Länge der ganzen Saite variabel machen. Statt eines derartigen Monochords habe ich kürzlich in einer mit Herrn Kurt Soldan zusammen angestellten, noch nicht veröffentlichten Beobachtungsreihe das Spearmansche Dichord[2]) benutzt, und zwar nach folgendem Modus. Die eine Saite wird mit einer Tonquelle von der gegebenen Schwingungszahl n unison gestimmt. Hierauf wird auf der zweiten Saite durch Ver-

1) Über d. Grenzen d. Tonwahrnehmung; Jena, 1876; Kap. III: Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonhöhen.

2) S. oben S. 248, Fig. 19.

gleichen mit der ersten die Länge l_h des eben merklich höheren und die Länge l_t des eben merklich tieferen Tones aufgesucht. Da die Voraussetzung erlaubt ist, daß die Schwingungszahlen dieser beiden Töne um den gleichen Betrag x von n differieren, so ergibt sich alsdann die Proportion $n + x : n - x = l_t : l_h$ und aus dieser sehr einfach x. Es ist nicht einmal nötig, daß die Schwingungszahl n des Standardtons exakt bestimmt ist, insofern kleine Abweichungen von deren wirklichem Werte die Größe x nicht wesentlich beeinflussen.

Im übrigen wurden diese Versuche nach der psychophysischen Methode der minimalen Änderungen ausgeführt. Natürlich steht aber auch dem nichts im Wege, etwa die Methode der mittleren Fehler anzuwenden, d. h. wiederholt beide Diehordsaiten durch die Versuchsperson unison stimmen zu lassen und aus den dabei unbemerkt bleibenden Schwingungszahlendifferenzen die Unterschiedsempfindlichkeit zu berechnen[1]). Eine ähnliche Untersuchung ist vor einigen Jahren von Hanichi Muraoka unternommen worden.[2])

Als nachteilig für alle Beobachtungen von der hier in Rede stehenden Art ist der Umstand zu bezeichnen, daß eine und dieselbe Saite, wenn sie gerissen, gestrichen oder ausklingend sich selbst überlassen wird, leicht in jedem dieser Fälle eine etwas andere Nuance der Tonempfindung hervorruft, so daß der Urteilende dadurch irritiert werden kann. Auch auf störende Spannungsänderungen der Saite muß man jederzeit gefaßt sein. Die Zungen sind, richtig behandelt, solchen Unregelmäßigkeiten im ganzen weniger unterworfen. Von seinem, bereits früher[3]) beschriebenen, speziell für die Prüfung der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit aus durchschlagenden Zungenpfeifen zusammengestellten „Tondifferenz-Apparat" sagt Preyer[4]) wörtlich: „Er gestattet eine mannigfaltige und feine Abstufung der Tonhöhe, ohne merkliche Änderung der Intensität und Klangfarbe, und erfordert außer einem geräuschlosen Luftstrom, den der Blasebalg liefert, und häufig wiederholter Kontrolle der Schwingungszahlen durch Zählung der Schwebungen nur einige Geschicklichkeit im Handhaben der Schieber. Denn die zu vergleichenden Töne müssen genau gleich lang dauern und gleichmäßig schnell abklingen, was man durch einige Übung bald erreicht, so daß der Beobachter maschinenmäßig die Schieber (immer ganz) herauszieht und zurückschiebt, mit der linken Hand den ersten, mit der rechten den zweiten Knopf haltend. Dann kommt es nur äußerst selten vor, daß ein Beobachter, welcher, mit dem Rücken gegen den Apparat gewendet, im mäßig erleuchteten Raume völlig ungestört sitzt, beim zweimaligen Angeben eines und desselben Tones eine Unterschiedsempfindung hat." C. Stumpf[5]) macht über die von A. Appunn für ihn gebauten Zungenkästen[6]) mit Rücksicht auf deren Verwendung zur Untersuchung der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit die folgenden Bemerkungen:

1) Auf die Einzelheiten der psychophysischen Maßmethodik kann hier nicht genauer eingegangen werden.

2) Referat darüber in den Fortschritten der Physik im Jahre 1910, 66. Jahrg., Abschnitt Akustik, S. 212.

3) S. oben S. 266.

4) A. a. O. S. 29.

5) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 6, S. 41, 1894.

6) S. oben S. 266 u. 267.

„Es zeigte sich, daß zwar die Stärke der Klänge sehr gleichmäßig, aber schon die Klangfarbe . . . nicht gleichmäßig genug war. Manche Zungen sind, wenn man recht genau hinhört, etwas milder als die übrigen. Leicht wird nun einer einen eben merklichen Höhenunterschied angeben, während das, was er bemerkt, vielmehr ein Unterschied der Farbe ist; und soll er sagen, welcher Ton höher ist, so wird er leicht den schärferen für höher halten. Erkennt er aber den Farbenunterschied als solchen, so kann ihn dieser durch Ablenkung der Aufmerksamkeit in der Höhenvergleichung stören. Nun kann man zwar die Farbe beeinflussen durch die Art, wie man das Zäpfchen behandelt: wenn man es nämlich nach dem Herausziehen (es muß stets vollständig herausgezogen sein) nicht losläßt, sondern nach oben drückt, wird der Klang schärfer, wenn nach unten, milder; aber hierbei wird auch die Höhe geändert, der Ton geht im ersten Fall hinauf, im zweiten hinunter, und nicht bloß scheinbar, wie die Schwebungen mit einer anderen Zunge lehren.“ Da ferner, wie Stumpf im weiteren Verlaufe dieser Erörterung ausdrücklich feststellt, mit der Zeit an sich kleine, aber gerade für eine Prüfung der Unterschiedsempfindlichkeit in der mittleren Tonregion doch erhebliche Verstimmungen der Zungen um ein oder einige Zehntel einer Schwingung eintreten können und dann nur mühsam zu beseitigen sind, so wird es begreiflich, daß manche Autoren die leichter in ihrer Stimmung regulierbaren Gabeln den Zungen vorziehen.

Fig. 86.

Die Gabeln[1]) haben dann freilich ihrerseits wieder den Nachteil, daß es viel Übung erfordert, sie durch Anschlagen oder Anstreichen mit stets gleichmäßiger Stärke zu erregen, und daß sie mit wachsender Höhe immer rascher abklingen. Bis zu einem gewissen Grade kann man übrigens diesen Übelständen damit begegnen, daß man die Intensität durch Resonatoren reguliert, welche je nach Bedarf den Gabeln mehr oder weniger genähert werden. Die Abstimmung der Tonhöhe läßt sich mit Hilfe von Laufgewichten bewirken; noch besser mittelst der in Fig. 86 abgebildeten Vorrichtung, die nach einem zuerst von Max Meyer angewendeten Verfahren von der Firma Max Marx und Berndt, Mechanische Werkstätten in Berlin N. W. 5, Stephanstr. 60, konstruiert wird. Das Bild zeigt die Zinke einer Gabel, in deren oberes Ende eine Schraube eingelassen ist. Sehraubt man diese tiefer in die Gabel hinein, so wird letztere verkürzt und der Ton höher; umgekehrt beim Herausdrehen. Die Trommel der Schraube ist mit einer Einteilung versehen; bei den verschiedenen Lagen innerhalb einer Umdrehung fallen verschiedene Striche derselben mit der Kante des links an der Zinke sichtbaren Zeigers zusammen, der auch seinerseits eine Skala trägt, an der die ganzen Schraubenumgänge abzulesen sind. Auf diese Weise läßt sich jede Zinkenlänge immer wieder genau und leicht herstellen. (Trotzdem wird man gut tun, mit der Tonhöhenkontrolle durch Schwebungenzählung nicht zu spar-

1) Mit solchen sind Versuche über die Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit angestellt von E. Luft, Wundts Philosoph. Studien, Bd. 4 (auch Inaugural-Dissertation, Leipzig 1888) und Max Meyer, Zeitschrift f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 16, 1898. Auf diese Abhandlungen sei auch bezüglich der speziell psychophysischen Untersuchungsprinzipien verwiesen.

sam zu sein, schon wegen etwa möglicher Temperaturänderungen der Gabeln.) Wie des weiteren aus der Abbildung hervorgeht, befindet sich im Innern der Hauptschraube noch eine zweite, welche unten konisch verdickt ist. Man dreht dieselbe nach der Einstellung aufwärts, bis der Konus die beiden Hälften der anderen Schraube auseinanderdrückt und fest in das Gewinde preßt, so daß jede Schlotterbewegung oder sonstige Verschiebung während des Schwingens unmöglich wird. Die Eichung solcher „Gabeln zur Untersuchung der Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit", wie man sie nennen könnte, bezieht sich auf jene Stellung der Schraube, in welcher diese auf die mit 0 bezeichneten Teilstriche eingestellt ist. Sie läßt sich von dieser Lage aus ungefähr gleich weit nach oben und unten drehen.

Die Unterscheidungsfähigkeit des Ohres gegenüber den sehr hohen und höchsten Tönen ist noch wenig untersucht, zweifellos aber verhältnismäßig gering, so daß man, wie schon angedeutet, hier von der absoluten Exaktheit der Schwingungszahlenbestimmung und Tonhöhenkonstanz bis zu einem gewissen Grade absehen kann. Als Tonquelle kommen wohl das Struyckensche Monochord und die Galtonpfeife am ehesten in Frage; letztere natürlich unter der Voraussetzung des Anblasens mit konstantem Druck.

In der tiefsten Region des Tonreiches ist die Klangfarbe der benutzten Instrumente von Einfluß auf die Tonhöhenunterschiedsempfindlichkeit. Die ganz tiefen Töne oder richtiger Klänge der Harmoniumzungen sind leichter zu unterscheiden als jene der Gabeln. Im ersteren Falle klammert sich allem Anschein nach das Ohr gleichsam an die in die mittleren Oktaven fallenden Obertöne, während bei der Beurteilung der weichen, leisen Klänge tiefster Edelmannscher Gabeln, wie ich wenigstens in meinen Vorlesungsversuchen immer wieder finde, relativ erhebliche Tonhöhendifferenzen unbemerkt bleiben. Über die Schwierigkeit, tiefste Klavier- und Kontrabaßsaiten nach den Grundtönen zu stimmen, hat C. Stumpf in seiner Tonpsychologie[1]) einige interessante Beobachtungen mitgeteilt, die es wert wären, zum Ausgangspunkt einer systematischen Untersuchung gemacht zu werden.

b) Bei gleichzeitigen Tönen.

Beobachtungen über die Empfindlichkeit für den Höhenunterschied zweier gleichzeitiger Töne sind von Bosanquet mittelst Harmoniumzungen, von Stumpf mit Orgelklängen, von Krueger mit Stimmgabeln angestellt, allerdings mehr in der Form vereinzelter oder gelegentlicher Ermittelungen. Eine gründlichere Untersuchung dieses Gegenstandes ist erst von mir in Gemeinschaft mit A. Guttmann[2]) ausgeführt worden.

Wir benutzten zunächst Edelmannsche Laufgewichtgabeln und Appunnsche Tonmesser. Bei ersteren erwies sich das rasche, ungleichmäßige Verklingen und die Schwierigkeit, sie immer gleichzeitig und gleich stark zu erregen, als recht störend. Letztere erfüllten zwar die Forderung, die beiden Teiltöne des zu beurteilenden Zweiklanges stets präzise zusammen einsetzen und aufhören lassen zu können, gewährleisteten auch die richtige

1) Bd. I, S. 301 ff.

2) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 32, S. 87 ff., 1903, woselbst auch Näheres über die ältere Literatur.

Intensität sowie eine genügende Dauer der Töne; jedoch war das Schwirren der Obertonschwebungen nachteilig und die Abstufung der Tonhöhen nicht klein genug. Befriedigende Resultate erhielten wir dagegen in der Region von 300 bis 1200 Schwingungen mit Hilfe des Sternschen Tonvariators. Die Töne desselben wurden durch eine Röhre in ein entferntes Zimmer geleitet, in dem die Versuchsperson, das Ohr nahe an die Röhrenmündung haltend, ihren Platz hatte. Der Grund für diese Maßregel war der, daß beim Beobachten von Tonquellen an Ort und Stelle öfter mit zufällig wechselnder Kopfhaltung des Hörers nicht unerhebliche Intensitäts- und Klangfarbenschwankungen eintreten, die hier durchaus vermieden werden mußten.

Der Verlauf einer einzelnen Beobachtungsreihe pflegte im übrigen der folgende zu sein. Ein Flaschenpaar wurde mittelst einer Stimmgabel auf die zu untersuchende Tonhöhe gebracht und unison gestimmt, worauf die eine Flasche, während die andere dauernd konstant blieb, durch eine entsprechende Kurbeldrehung um ca. eine bis zwei Schwingungen verstimmt ward. Hatte der Hörende sein Urteil über die Einzelheiten des derart gestörten Einklangs abgegeben, so veränderte man das Intervall wieder um einen geringen Betrag und fuhr so fort, bis eine genügende Menge von Intervallen (in regelloser Folge) zwischen dem Unisono und der Zweiheitsgrenze durchgeprüft war. Jede Einzelbeobachtung dauerte etwa eine halbe Minute, während welcher Zeit die Töne vom Blasebalge mit genügend konstantem Drucke unterhalten wurden. Zum Schlusse jeder Versuchsreihe wurden die Schwingungszahlen, welche den für das Resultat wesentlichen Einstellungen der Flaschen entsprachen, durch Schwebungszählungen oder sonstiges Vergleichen mit Tonquellen von bekannter Höhe kontrolliert, wobei es allerdings nicht auf Bruchteile einer Schwingung ankam, da die Unterschiedsempfindlichkeit für gleichzeitige Töne ganz erheblich geringer ist als für aufeinanderfolgende und dem Schwellenwert überdies eine gewisse Schwankungsbreite zukommt.

Bezüglich des Einflusses der Klangfarbe zeigte sich auch hier wieder, daß die Anwesenheit deutlicherer Obertöne die Tonhöhenunterscheidung begünstigt.

4. Intensitätsschwellen und Hörschärfemessung. Unterschiedsempfindlichkeit für Intensitäten.

a) Bei Tönen.

Wie bei allen Sinnesempfindungen ist auch bei der Tonempfindung deren Intensität abhängig von der Reizgröße, d. h. von der physikalischen Tonstärke. Der Physiker definiert nun wohl die Tonstärke als die kinetische Energie, die der tönende Körper aussendet, sofern oder soweit dieselbe auch wirklich als Schall und nicht etwa in einer anderen Bewegungsform, wie z. B. Wärme, in die Erscheinung tritt. Für den Physiologen kommt aber in jedem gegebenen Falle von der gesamten Schallenergie nur dasjenige Quantum in Betracht, welches die Trommelfellfläche trifft und erregt. Wir verstehen daher mit Rayleigh[1]) unter der physikalischen Intensität einer

1) Die Theorie des Schalles; Braunschweig 1879, § 245.

fortschreitenden Tonwelle jene Schallmenge, welche in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit hindurchgeht.

Das optische Seitenstück hierzu, nämlich die Helligkeit, welche eine gegebene Fläche aus einer bestimmten Entfernung von einer Lichtquelle empfängt, ist relativ leicht zu messen. Man bestimmt zunächst mit Hilfe der einen oder anderen photometrischen Methode die Intensität der Lichtquelle selbst und macht sodann Anwendung von dem Gesetz, daß das Licht sich nach allen Richtungen des Raumes gleichmäßig ausbreitet, die Punkte gleicher Helligkeit also (bei hinreichend großer Entfernung) auf Kugeloberflächen liegen, die die Lichtquelle als gemeinschaftlichen Mittelpunkt haben. In einem Abstande n von der Lichtquelle verteilt sich hiernach deren Intensität i auf die Kugeloberfläche $4\pi n^2$ und entfällt auf die Flächeneinheit die Helligkeit $\frac{i}{4\pi n^2}$.

Dahingegen bieten die entsprechenden Verhältnisse in der Akustik ganz erheblich größere Schwierigkeiten. Die Methodik zur Bestimmung der gesamten von irgendeiner Klangquelle produzierten Schallenergie hat sich gegenwärtig noch kaum über die ersten Anfänge der Entwickelung erhoben, wie die Erörterungen dieses Themas in Auerbachs Akustik[1]) sowie in meinem Artikel „Gehörssinn" des Nagelschen Handbuches der Physiologie[2]) zeigen. Aber selbst wenn wir die Intensität einer Schallquelle mit der gleichen Bequemlichkeit und Sicherheit messen könnten wie diejenige einer Lichtquelle, so würden wir immer noch einem zweiten Hindernis begegnen, nämlich dem Umstande, daß die Schallstärke nicht wie die Lichtstärke einfach dem Quadrate der Entfernung vom Ursprungsorte umgekehrt proportional ist. Dieses Gesetz gilt für den Schall höchstens annähernd bei Versuchen im völlig freien Luftraum und bei absoluter Windstille, keinesfalls aber in geschlossenen Zimmern, auf die man beim Experimentieren im allgemeinen angewiesen zu sein pflegt. Denn hier bilden sich infolge der mehrfachen Reflexion an Fußboden, Decke, Wänden und Einrichtungsgegenständen stehende Wellen mit Maximis und Minimis der Intensität, also ganz komplizierte, von Fall zu Fall wechselnde Verhältnisse, die sich in keine Regel fassen lassen. Daß auch die Wahl möglichst großer Räumlichkeiten in dieser Beziehung keine Abhilfe schafft, haben die Versuche von Sieveking und Behm[3]) gezeigt, die auf einem Kasernenhof von 10000 qm Bodenfläche das quadratische Gesetz der Schallabnahme mit der Entfernung noch immer durch Maxima und Minima gestört fanden.

Unter solchen Umständen wird man es vorziehen müssen, die an irgendeiner Stelle des Raumes auf die Flächeneinheit entfallende Schallenergie unmittelbar an dieser Stelle selbst zu messen. Von den hierüber vorliegenden Versuchen sei das Folgende erwähnt.

Ein zuerst von Kundt angegebenes Verfahren ausgestaltend und verbessernd, hat A. Raps[4]) zwecks objektiver Darstellung der Schallintensität

1) Band II des Winkelmannschen Handbuches der Physik, Leipzig 1909; s. namentlich Kap. IV, 2, S. 228ff.
2) Band III, S. 488ff., Braunschweig 1905.
3) Annalen d. Phys. (4. Folge), Bd. 15, S. 793, 1904.
4) Wiedemanns Annalen d. Physik u. Chemie, Bd. 36, S. 273ff., 1889.

die Druckmaxima und -minima im Knoten einer tönenden Pfeife manometrisch bestimmt, woraus sich dann die Amplitude eines Luftteilchens an irgend einem Punkte im Innern der Pfeife berechnen läßt. Das Manometer war so eingerichtet, daß mit wachsendem resp. abnehmendem Druck eine dasselbe abschließende Membran sich hob bezichungsweise senkte und ihre Bewegungen dabei auf einen Spiegel übertrug, dessen Ausschläge mittelst Skala und Fernrohr gemessen wurden. Die Auswertung der Manometerablesungen geschah durch Vergleichen der verschiedenen Einstellungen des Membranmanometers mit einem Wassermanometer. Als die beste Art der Verbindung zwischen der Pfeife und dem Manometer erwies es sich, vor einem horizontalen Spalt in der Wand der Pfeife einen zweiten ebensolchen, mit der Zinke einer elektrisch getriebenen Stimmgabel verbundenen derart auf und ab schwingen zu lassen, daß Pfeife und Manometer nur im Moment der Koinzidenz der Spalte kommunizierten, sonst aber beide luftdicht geschlossen waren. Die Gabel war nahezu unison mit der Pfeife, so daß die Manometerbewegungen, ähnlich wie bei der Stroboskopie, den schnellen Druckschwankungen des Pfeifenknotens in verlangsamtem Tempo folgten. Was an dieser Stelle besonders interessiert, ist die Angabe, daß auch in freier Luft Beobachtungen über die Schallintensität ausgeführt wurden. Es stellte sich heraus, daß die Luftverdichtungen und -verdünnungen, welche eine mäßig stark angeblasene Pfeife in der freien Luft erzeugte, gut meßbare Manometerausschläge gaben, die selbst in der Entfernung von 4 Metern noch lange nicht die Empfindlichkeitsgrenze der Vorrichtung erreichten. Da sich jedoch in dem Beobachtungsraume stehende Wellen mit nachweisbaren Maximis und Minimis ausbildeten, wurden diese Versuche nicht weiter fortgesetzt.

In den der oben gegebenen Rayleighschen Definition der Tonintensität entsprechenden mathematischen Ausdrücken kommt entweder die Amplitude und die Schwingungszahl des Tones vor oder statt deren das Verhältnis der größten Druckänderung zum Normaldruck. Letztere Formulierung, die den Vorzug der Unabhängigkeit von der Tonhöhe besitzt, hat Max Wien[1]) seinen Versuchen über die Messung der Tonstärke an der einen oder anderen Stelle des Raumes zugrunde gelegt. Um stärkere Druckänderungen zu erhalten, als sie in freier Luft auftreten, verwendete er Resonatoren. Auf die sonst in das Ohr zu steckende Öffnung eines Helmholtzschen Resonators wurde nach passender Erweiterung eine dünne elastische Metallplatte aufgelötet, deren Eigenton mit dem des Resonators übereinstimmte, so daß sie bei Erregung des letzteren in verhältnismäßig beträchtliche Schwingungen geriet. Mittelst eines auf der Platte befindlichen Stiftes wurde deren Bewegung auf einen Spiegel übertragen. Das Bild eines Spaltes, das der Spiegel in ein Fernrohr wirft, erscheint durch dieses betrachtet, sobald das System schwingt, nicht als Lichtlinie sondern als helles Band, und die Breite des Bandes ist der Druckdifferenz resp. der Amplitude des Tones proportional. Wien benutzte drei solche „empfindliche“ Resonatoren, entsprechend den Tönen a^0, e^1 und a^1. Aus der an dem Lichtbande gemessenen Druckdifferenz im Resonator ließ sich diejenige außen an der Öffnung desselben

1) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 36, S. 834ff., 1889.

rechnerisch auf Grund gewisser Helmholtzscher Formeln und auch experimentell ermitteln und dann durch Reduktion der Ausschläge des empfindlichen Resonators auf die eines „absoluten" direkt in Quecksilberdruck angeben. Der absolute Resonator unterscheidet sich dabei von dem entsprechenden empfindlichen lediglich durch den erheblich höheren Eigenton der Platte. Läßt man den zu prüfenden Ton gleichzeitig auf den empfindlichen und den absoluten Resonator wirken und stellt nachher den dadurch im absoluten Resonator erzielten Spiegelausschlag durch einfache Kompression der Luft im Resonatorraum wieder her, so kann man ohne allzu großen Fehler den Druck der tönenden Luft im absoluten Resonator dem einfachen, mittelst Manometers gemessenen Kompressionsdruck unmittelbar gleichsetzen.

Trifft eine Schallwelle auf eine reflektierende Wand, so übt sie auf diese einen Druck aus. Altberg[1]) hat zur Messung desselben einen besonderen Apparat benutzt. In der reflektierenden Wand befindet sich eine kurze Röhre und in dieser ein fast luftdicht schließender Stempel aus Holz, dessen Vorderfläche den Schall empfängt und dessen Rückseite mit dem einen Hebelarm einer Drehwage in Verbindung steht, die unter der Wirkung des Schalldruckes einen Ausschlag macht. Aus der Direktionskraft des Aufhängefadens der Wage, der Länge des Hebelarmes, der Größe der Stempeloberfläche und dem durch Spiegelablesung beobachteten Ablenkungswinkel der Wage läßt sich der Schalldruck berechnen und aus diesem nach einer einfachen Formel von Rayleigh auch die in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit der reflektierenden Wand auftreffende Schallenergie.

Während die Wiensche Methode nur auf Tonschwingungen Anwendung finden kann, ist die Altbergsche von der Schwingungsform der Schallwelle gänzlich unabhängig. Dasselbe gilt von dem nun noch zu besprechenden Verfahren von Zernov[2]), welches an die 1882 von Rayleigh gemachte Beobachtung anknüpft, daß ein leichtes, um eine vertikale Achse drehbares Scheibchen sich mit ziemlicher Entschiedenheit senkrecht gegen die Richtung alternierender Luftströmungen einstellt. Die Zernovsche Versuchseinrichtung besteht in einem, auf hohem Fuße montierten, an sich offenen und nur zum Schutze gegen Luftströmungen mit Gaze umhüllten Gehäuse, von dessen Decke an einem dünnen Quarzfaden als Rayleighsches Scheibchen ein Galvanometerspiegelchen von 3 mm Durchmesser und 0,004 g Gewicht herabhängt. Aus der Ablenkung desselben ermittelte Zernov mit Hilfe von Formeln, die von W. Koenig angegeben und von ihm selbst experimentell geprüft beziehungsweise ergänzt worden sind, die Schallenergie (ausgedrückt in Ergs pro ccm), welche durch lautes Schreien und Singen in 2 Meter Entfernung vom Scheibchen hervorgebracht wurde.

Soviel über die Methodik zur Bestimmung der akustischen Energie, die von irgendeiner Schallquelle an eine irgendwo im Raume befindliche Fläche von bekannter Größe abgegeben wird. Um auf dem gleichen Wege die Empfindlichkeit des Ohres gegenüber den verschiedenen Tönen und Geräuschen zu prüfen, müßte man zunächst entweder die Intensität der jeweils

1) Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 11, S. 405 ff., 1903.
2) Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 26, S. 79 ff., 1908.

in Frage kommenden Schallquelle oder deren Abstand vom Ohre so regulieren, daß die akustische Wahrnehmung gerade den Schwellenwert hat, und dann mit dem physikalischen Meßapparat an derselben Stelle des Raumes, die zuvor das Ohr einnahm, die akustische Energie ermitteln. Von dem Ziele, diese Aufgabe in jedem beliebigen gegebenen Falle lösen zu können, ist die physiologische Technik noch weit entfernt. Ganz besonders schwerwiegend fällt dabei ins Gewicht, daß die Feinheit des Gehörs diejenige der einschlägigen physikalischen Instrumente mehr oder weniger erheblich übertrifft. — Von den eben erwähnten Autoren hat nur Wien Messungen der dem Schwellenwerte der Tonempfindung entsprechenden physikalischen Intensität unternommen, wobei als Tonmittel ein Telephon diente. Er sagt darüber:[1] „Es war die Empfindlichkeit des Resonators nicht ganz so groß wie die des Ohres; es wurde deshalb der Resonator an einen Ort A in der Nähe der Tonquelle gebracht, das Ohr an einen entfernteren Punkt B. Das Verhältnis der Druckdifferenz in A und in B wurde einfach festgestellt, indem der Resonator das eine Mal in A, das andere Mal in B aufgestellt wurde: das Verhältnis war dann direkt durch das der Ausschläge gegeben. Bei der Untersuchung selbst konnte mit der einen Hand durch Änderung eines Alkoholwiderstandes der Telephonton beliebig geschwächt werden; mit der anderen konnte durch Öffnen und Schließen des Stromes mittelst eines Quecksilberkontaktes der Ton intermittiert werden, da man einen solchen viel besser verfolgen kann als einen konstanten. Nun wurde von einem hörbaren zu einem nicht mehr hörbaren, dann von einem nicht mehr hörbaren zu einem gerade hörbaren Ton übergegangen und die Ausschläge des Resonators in beiden Fällen beobachtet. Das Mittel gab die Reizschwelle."

Leichter ausführbar als die absolute Messung der eben merklichen physikalischen Tonintensität ist die relative, die Bestimmung der Hörschärfe, wobei es sich um die Vergleichung der Empfindlichkeit des zu prüfenden Ohres mit der eines normal hörenden handelt. Die Hörschärfe gegenüber einem einfachen Tone ist umgekehrt proportional derjenigen physikalischen Intensität desselben zu setzen, bei welcher eben noch eine Wahrnehmung möglich ist. Bezeichnen wir mit H_n die normale, mit H_p die zu prüfende Hörschärfe und mit I_n bzw. I_p die zugehörigen Schwellenintensitäten, so ist $H_p : H_n = I_n : I_p$ oder $H_p = \frac{I_n}{I_p} \cdot H_n$. Für die Messung der Hörschärfe ist also die Kenntnis der absoluten Werte von I_n und I_p nicht nötig, es genügt die des Verhältnisses $I_n : I_p$.

Sehr bequem würde der Wert dieses Bruches zu finden sein, wenn die Abnahme der Tonintensität mit der Entfernung von der Schallquelle wie beim Lichte dem Quadrate eben dieser Entfernung proportional wäre. Da indessen, wie wir gesehen haben, diese oder eine ähnlich einfache Gesetzmäßigkeit für die Ausbreitung des Schalles nicht gilt, zum mindesten nicht unter den gewöhnlich bei Hörschärfeprüfungen in Betracht kommenden Umständen, so müssen alle Vorschläge oder Versuche, die Entfernung von der

1) A. a. O. S. 848 ff.

Tonquelle als Maßstab für die Empfindlichkeit des Ohres zu verwerten, von vornherein als prinzipiell verfehlt und unbrauchbar abgelehnt werden.

Ein gangbarerer Weg ist die Benutzung der sogenannten Hördauer, d. h. der Zeit, während welcher eine in Schwingungen versetzte und dann, sich selbst überlassen, allmählich verklingende Tonquelle das Ohr erregt. Von den hierfür in Betracht kommenden Instrumenten, den Saiten, Zungen und Gabeln, haben nur die letzteren praktische Anwendung gefunden.

Hat die Amplitude einer Gabel in irgendeinem gegebenen Zeitmoment die Größe a_0, so ist sie zufolge der mathematisch-physikalischen Theorie von der Dämpfung freier Schwingungen durch innere und äußere Reibung nach weiteren t Sekunden auf $a_0 e^{-ht}$ gesunken. Hierauf basiert das folgende Verfahren zur Vergleichung der Empfindlichkeit zweier verschiedener Gehörorgane gegenüber einem und demselben Stimmgabeltone. Man stellt zunächst die Zeit t_p fest, während der das schlechter hörende Ohr die Gabel vernimmt, und bringt dann das feinere Ohr genau an dieselbe Stelle des Raumes und in dieselbe relative Lage zur Gabel, an der inzwischen nichts verändert werden darf, um nun auch für dieses den Zeitpunkt t_n, in welchem der Ton eben unhörbar wird, zu bestimmen. Da unter solchen Versuchsumständen von den für die physikalische Stärke des Tones maßgebenden Faktoren sich nichts ändert als die Amplitude (und da letztere in dem mathematischen Ausdruck für die Energie der Gabel in der zweiten Potenz erscheint), so darf man die Proportion $I_n : I_p = (a_0 e^{-ht_n})^2 : (a_0 e^{-ht_p})^2$ aufstellen, woraus sich dann $H_p = e^{-2h(t_n - t_p)} \cdot H_n$ ergibt.

In den vorstehenden Gleichungen ist e die Basis der natürlichen Logarithmen und h die sogenannte Dämpfungskonstante oder Dämpfung schlechthin. Diese Größe ist für jede einzelne Gabel gesondert zu ermitteln und überdies nicht bloß von der Beschaffenheit der Gabel, sondern auch von deren Befestigung (Verklingen im Hängen, Stieleinklemmung etc.) abhängig. Statt der Dämpfung h wird indessen, um das Abschwingen zu charakterisieren, gewöhnlich das Dämpfungsverhältnis oder noch öfter das logarithmische Dekrement angegeben. Bezeichnen wir mit τ die Schwingungsdauer[1]) der Gabel, so ist das Verhältnis zweier aufeinander folgender Elongationen (Ausschläge aus der Ruhelage bis zur Umkehr), die beide nach derselben Seite gerichtet sind, gleich $\frac{a_0 e^{-ht}}{a_0 e^{-h(t+\tau)}}$ oder $e^{h\tau}$. Eben dieser Wert $e^{h\tau}$ ist das Dämpfungsverhältnis und $h\tau$ das (natürliche) logarithmische Dekrement. Zwecks experimenteller Feststellung des letzteren mißt man zwei passend distante Amplituden a_0 und a_t. Die zweite möge der ϱ-te Teil der ersten sein. Ist dann noch die Zeit, innerhalb welcher a_0 auf a_t sinkt, ausgedrückt in der Anzahl s der Schwingungen, bestimmt, so ist offenbar $a_t = a_0 e^{-sh\tau} = \frac{a_0}{\varrho}$ und $h\tau = \frac{\log \text{nat}\, \varrho}{s}$. Beispielsweise angenommen,

1) Da in der otiatrischen Literatur zuweilen die Begriffe Schwingungsdauer und Abklingezeit verwechselt werden, ist es vielleicht nicht überflüssig, daran zu erinnern, daß man unter „Schwingungsdauer" die zu jeder einzelnen Schwingung nötige Zeit versteht, eine Gabel, welche n Schwingungen pro Sekunde macht, also die Schwingungsdauer $\frac{1}{n}$ hat.

eine Gabel von der Schwingungszahl 128 (also von der Tonhöhe c^0) habe in einem gewissen Moment der Abklingezeit die Zinkenenden-Amplitude 0,5 mm und diese betrage 10 Sekunden oder 1280 Schwingungen später nur noch 0,1 mm, so ist $\varrho = 5$ und das natürliche logarithmische Dekrement $\frac{\log \text{nat } 5}{1280} = 0{,}001257$.[1])

Der reinen Theorie nach ist das logarithmische Dekrement einer Stimmgabel eine Konstante. Eine Reihe von Autoren, Physiker einerseits und Ohrenärzte andererseits, haben es sich angelegen sein lassen, die Richtigkeit dieses Postulates experimentell zu prüfen. Näheres über Publikationsort und Inhalt der betreffenden Arbeiten, die zugleich Aufschluß über die Methodik der Amplitudenmessung geben, findet der Leser bei F. Auerbach[2]) und in meinem Artikel „Gehörssinn" in Nagels Handbuch der Physiologie[3]). Die Untersuchungen kommen zumeist zu dem Ergebnis, daß das Dekrement faktisch nicht konstant ist, vielmehr mit der Amplitude wächst und abnimmt, indem es sich in erster Annäherung als eine lineare Funktion der letzteren darstellen läßt. Struycken[4]) vertritt allerdings den Standpunkt, daß dieses Resultat auf die Einklemmung des Stieles zurückzuführen sei, wobei keine Gabel regelmäßig ausklinge. Eine gut, d. h. mathematisch konstruierte, unbelastete Gabel von nicht zu kleinen Dimensionen folge dagegen nach leisem Anschlag ziemlich genau dem mathematischen Gesetze, wenn sie, am zentralen Ende des Stieles mit zwei Fingern gefaßt, hängend gehalten werde. An solchen Gabeln könne man sehr leicht mit Hilfe der Dreieckfigürchen[5]) direkt beobachten, daß, während die Sekundenzahl in arithmetischer Reihe wächst, die Amplitude in geometrischer abnimmt. Sei z. B. die Zeit, in der die Amplitude von 100 μ auf 10 μ heruntergehe, gleich 25 Sekunden, so vergingen auch von 10 μ bis 1 μ und von 1 μ bis 0,1 μ je 25 Sekunden. Von c^2 aufwärts ändere sich das Dekrement der Stimmgabeln auch beim Halten in aufrechter Stellung nur wenig.

Jedenfalls wird die Dämpfung für die praktischen Zwecke der Hörschärfeprüfung als genügend konstant betrachtet werden dürfen, zumal wenn man von den ersten Momenten der Abklingezeit, wo die Amplituden relativ steil sinken, absieht und die Gabeln hängend benutzt. Als Instrumentarium zur Bestimmung der Hörschärfe mittelst der Hördauer ließe sich vielleicht mit Vorteil ein Stimmgabelapparat verwenden, wie ihn Ostmann[6]) in seiner Abhandlung „Vom objektiven zum einheitlichen Hörmaß" beschrieben und

1) Nach A. Kalähne, Grundzüge d. math.-physik. Akustik, I. Teil; Leipzig u. Berlin, 1910, S. 62 ff.

2) Akustik; Bd. II des Handbuches d. Physik v. Winkelmann, 2. Aufl., Leipzig 1909, S. 356 ff.

3) Band III, S. 494; Braunschweig 1905. — Man beachte auch die Versuche von Gradenigo und Stefanini, die Zinken von Stimmgabeln durch Fäden zu spannen, an denen Gewichte ziehen, durch Abbrennen der Fäden die Gabeln in Bewegung zu setzen und mit Umgehung von Amplitudenmessungen die Dämpfung aus einer Formel zu berechnen, in der nur die Größen der Gewichte und die Hörzeiten vorkommen. (Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 56, S. 98 ff. u. Bd. 57, S. 73 f. — Gradenigo, Sulla acumetria; Siena 1908.)

4) Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 46, S. 380 f.

5) S. weiter unten.

6) Zeitschr. f. Ohrenheilk., Bd. 51, S. 237 ff., 1906.

abgebildet hat (Fig. 87). Die Gabeln, welche die Töne C, c^0, c^1, c^2, c^3, c^4 repräsentieren, hängen hier auf schmiedeeisernen, mit einem Gummischlauch straff überzogenen Sätteln, deren Kanten allein die Zinken in oder unmittelbar neben den Knotenpunkten unterstützen, und die Zinkenenden liegen alle in einer und derselben horizontalen Linie. Beim Abhören wird das Ohr gegen zwei dünne eiserne Führungsstangen gelegt, so daß sich Ohr und Gabel stets in gleicher gegenseitiger Stellung und Distanz befinden. Vor der dritten Gabel sieht man in der Abbildung 87 einen Schalldämpfer, eine dicke, an einem eigenen Stabe bewegliche Korkplatte, deren Vor-

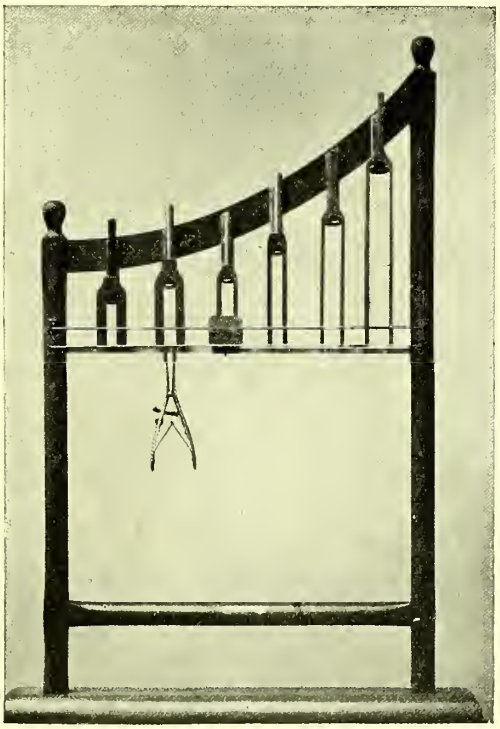


Fig. 87.

schieben es ermöglicht, den betreffenden Ton intermittierend hören zu lassen und damit die Beobachtung in gewisser Weise zu erleichtern. Der ebenfalls in der Figur mit dargestellte Gabelspanner soll nach Ostmann in nahezu idealer Weise bewirken, daß man stets von einer ganz bestimmten Schwingungsweite der Gabel auszugehen vermag. Er wird in entspanntem Zustande von unten zwischen die Zinken geführt, hierauf bis zu dem ein für allemal festgesetzten, an der Zahnstange abzulesenden Grade gespannt und schließlich senkrecht nach unten abgezogen. Wenn man den Spanner benutzt und die normale Abklingezeit der Gabel t_n als Konstante betrachtet, wäre die Hörschärfeprüfung einfach so anzustellen, daß man in dem Moment, wo der Ton anhebt, eine Stoppuhr in Gang setzt und die Zeit t_p be-

stimmt, während welcher der zu Untersuchende die Gabel hört. Die zugehörige Hörschärfe $H_p = e^{-2h(t_n - t_p)} \cdot H_n$ ließe sich dann aus einer für alle möglichen Werte von t_p berechneten Tabelle entnehmen, zu deren Herstellung natürlich zunächst die Größen h und t_n für jede einzelne Gabel empirisch ermittelt werden müßten. Wollte man auf die Anwendung des Spanners und überhaupt eines konstanten Anschlags der Gabeln verzichten, so wäre auch t_n in jedem Falle besonders zu bestimmen. Bei alledem ist allerdings die Grundvoraussetzung die, daß das Reiten der Gabeln auf den Sätteln die angebliche stete Unveränderlichkeit der Dämpfung der Gabeln wirklich gewährleistet, worüber ich ein Urteil aus eigener Erfahrung nicht abgeben kann.

Für manche Untersuchungen, bei denen es nur auf einen ungefähren Überblick über etwaige Veränderungen der Hörschärfe ankommt, genügt übrigens die einfache Vergleichung der Hörzeiten t_p und t_n; so beispielsweise, wenn es sich um die Frage handelt, ob eine bestimmte Art von Verschluß des Gehörganges die Tonperzeption mehr herabsetzt als eine andere[1]), oder ob eine anhaltende Reizung des Nervus acusticus eine Ermüdung, d. h. eine in der Verkürzung der normalen Hördauer zum Ausdruck gelangende Verminderung der Empfindlichkeit, für den einen oder anderen Ton zur Folge hat.

Die Tonintensität einer unter unverändert bleibenden Bedingungen abschwingenden Stimmgabel verringert sich proportional dem Quadrat der Amplitude. Wenn also bei einer und derselben Gabel für ein zu prüfendes Ohr die Schwellenintensität I_p bei der Amplitude a_p erreicht ist und der normalen Schwellenintensität I_n unter ganz den gleichen Beobachtungsverhältnissen die Amplitude a_n entspricht, so verhält sich $I_p : I_n = a_p^2 : a_n^2$ und $H_p : H_n = a_n^2 : a_p^2$.

Demgemäß könnte man zum Zwecke der Hörschärfebestimmung mittelst Amplitudenmessung folgendes Verfahren wählen. Auf der Zinkenkante einer passend befestigten Gabel wird ein leuchtender Punkt[2]) erzeugt und dessen, die doppelte Amplitude repräsentierende, Exkursionsbreite während des Schwingens der Gabel mittelst eines Mikroskopes mit Okularmikrometer gemessen. Gleichzeitig wird die Gabel zuerst von dem schlechteren, dann von dem besseren der zu vergleichenden Ohren behorcht, wobei streng darauf zu achten ist, daß beide sich in genau derselben Lage zur Gabel befinden. Jeder der Hörer gibt dann den Moment an, wo für ihn die Tonempfindung erlischt, und der Beobachter am Mikroskop liest die zugehörigen Amplituden von der Gabel ab.

Diese Methode wäre jedoch — abgesehen von gewissen sonstigen Schwierigkeiten, namentlich der, daß die normale Schwellenamplitude der höheren Gabeln sich wegen ihrer Kleinheit der direkten Messung entzieht — für

1) Vgl. K. Spangenberg, Über das Durchdringen von Schall durch Verschlüsse des Gehörganges mit besonderer Berücksichtigung der gangbaren Antiphone, Passows und Schaefers Beiträge zur Anat. usw. des Ohres usw., Bd. 6, S. 121ff., 1913.

2) Als solchen benutzte z. B. Ostmann ein feines Mehlstaubkörnchen; Quix klebte an die Gabelzinke ein Aluminiumplättchen, das mit einem äußerst kleinen Loch versehen war, durch welches das Licht einer elektrischen Lampe hindurchschien.

den häufigeren praktischen Gebrauch zu umständlich. Man ist daher auf das Auskunftsmittel gekommen, für jede Gabel eine ein für allemal gültige Abschwingungskurve zu konstruieren, deren Abszisse die Zeiten darstellt und deren Ordinaten von den abnehmenden Amplituden gebildet werden, respektive eine Tabelle, aus der sich die Schwellenamplituden unmittelbar gemäß der Hördauer entnehmen lassen. Die Hörprüfung verläuft hierbei einfach so: Die Gabel wird mit einem der Hülfsmittel zur Erzielung einer konstanten Anfangsamplitude, dem Lucaeschen Hammer, dem Dölgerschen Apparat, dem Ostmannschen Spanner oder der vorhin erwähnten Gewicht-Faden-Methode von Gradenigo und Stefanini, zum Schwingen gebracht und zugleich die Stoppuhr in Gang gesetzt. Ist mittelst letzterer die Dauer der Tonwahrnehmung bei dem zu Untersuchenden gleich t_p bestimmt, so wird aus der Kurve oder Tabelle ermittelt, bis zu welcher Größe a_p die Anfangsamplitude zur Zeit t_p abgesunken ist; die der Hördauer t_n entsprechende normale Schwellen-

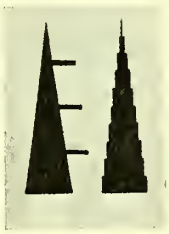


Fig. 88.

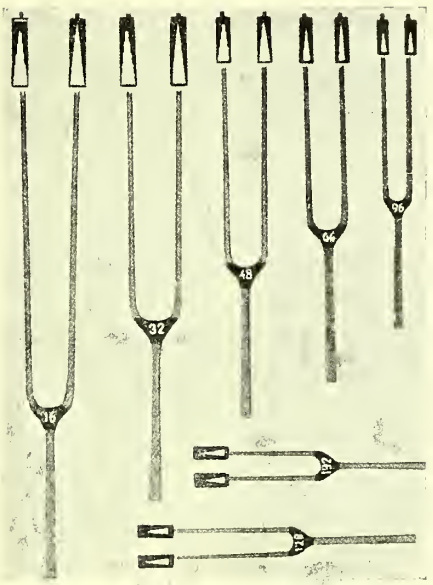


Fig. 89.

amplitude a_n kann nach einmaliger Feststellung durch Beobachtung oder durch Berechnung aus dem Abschwingungsgesetz für alle Versuche als konstant und bekannt angesehen werden. Exakte Resultate sind aber auf diesem Wege nur dann zu erreichen, wenn die Gabel in sämtlichen einzelnen Gebrauchsfällen erstens mit genau derselben Anfangsamplitude zu schwingen beginnt, welche sie bei der Eichung hatte, zweitens mit stets unveränderter Befestigung benutzt wird (damit die Dämpfung nicht etwa variiere) und drittens ihren Ton in immer gleicher Weise auf das beobachtende Ohr überträgt.

Diesen drei Bedingungen, hauptsächlich der zweiten, Genüge zu leisten, ist nicht so ganz leicht. Es ist deswegen besonders anerkennenswert, daß Gradenigo ein einfaches Verfahren erfunden hat, die Amplitude unmittelbar auf der Gabelzinke zu markieren.[1]) Zu diesem Zwecke befestigt er eines

1) Zuerst demonstriert auf dem 6. Internationalen Otologischen Kongreß zu London 1899; ferner: Arch. Ital. di Otologia ecc., Vol. IX, p. 46 und Sulla acumetria. Siena 1908, p. 65.

von den beiden Dreieckchen der Abbildung 88 auf der Kante des Laufgewichtes der Gabel (vgl. Fig. 89).[1]) Wenn die Zinke schwingt, spaltet sich infolge einer bekannten optischen Täuschung das Dreieck in zwei Dreiecke auseinander, die, von der Basis her beginnend, in dem Maße wieder zusammenrücken, wie die Exkursionsbreite der Schwingungen beim Abklingen sich verringert. Die verschiedenen Stadien der Fig. 90 veranschaulichen diesen Vorgang. Die Ablesung der Amplitude während desselben basiert auf folgen-

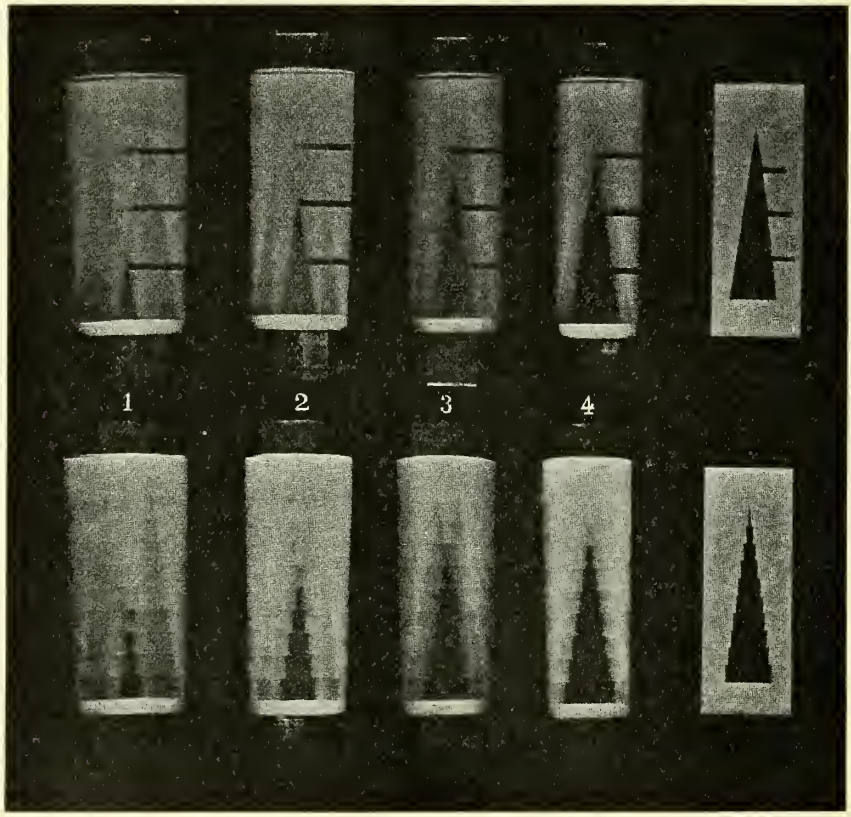


Fig. 90.

der einfachen Überlegung. Berühren sich die beiden Dreiecke gerade im Eckpunkte der Basis, so bedeutet dies offenbar, daß eben dieser Punkt einen Ausschlag gleich der Länge der Basis macht; die Amplitude der Gabelzinke ist also gleich der halben Grundlinie des Dreiecks. Ebenso ist, wenn die Spitze der Überschneidung wie in den Stadien 1, 2 und 4 der Abbildung 90 gerade einen der drei Horizontalstriche erreicht hat, die Amplitude gleich dem halben Durchmesser des Dreiecks in der betreffenden Höhe. Bei der

1) Solche Gabeln resp. Dreieckfigürchen sind u. a. zu beziehen durch die Firma H. Pfau, Berlin N.W. 6, Luisenstr. 48.

gezähnten Figur beträgt die Amplitude in dem, für das Auge durch die beginnende Schwärzung scharf erkennbaren, Momente der Berührung zweier Kanten die Hälfte von der Breite der in Frage kommenden Stufe.

Am besten eignet sieh die Gradenigosche Methode[1]) für die ganz tiefen Stimmgabeln in der Gegend der unteren Hörgrenze. Ungefähr bis zur Mitte der Kontraoktave läßt sich die normale Schwellenamplitude allenfalls noch bestimmen. Höher hinauf wird dieselbe aber dazu zu klein, und bei etwa 250 Schwingungen erreieht die Anwendbarkeit des Verfahrens in dieser Form überhaupt ihr Ende. Weiter kommt man erst dadurch, daß man Lupenvergrößerungen anwendet.

Einen wesentlichen Fortschritt in letzterer Hinsicht verdanken wir H. J. L. Struycken, weleher seine Methode 1904 in der Zeitschrift für Ohrenheilkunde[2]) folgendermaßen beschrieben hat: „Mittels der Interferenzkreise eines Lichtpunktes kann man die Amplitude optiseh wahrnehmen bis $^1/_{20000}$ mm, doeh ist Gradenigos Schattenmethode für Werte bis 1 μ und Gabeln bis c^4 geeigneter."

Eine mikrophotographische Reproduktion nebenstehender Figur 91a, an-

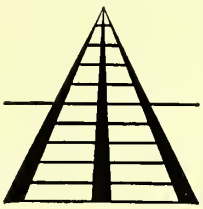


Fig. 91a.

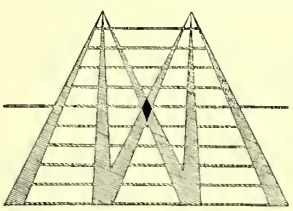


Fig. 91b.

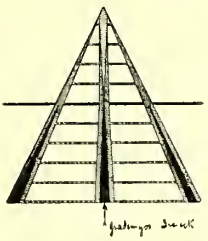


Fig. 91c.

gefertigt von Möller in Wedel[3]), wird im Zinkenzwischenraum am Ende einer Stimmgabelzinke fixiert. „Beobachtet man diese Figur, während die Stimmgabel schwingt, unter dem Mikroskop, so sieht man Doppelbilder, deren Entfernung gleich dem Ausschlag ist. Ist der Ausschlag wie in Fig. b, so sieht man in der mittleren Vertikallinie eine Kreuzung der Seitenschenkel, deren obere Grenze die Größe der Amplitude angibt. Findet diese Kreuzung an der Basis des Dreiecks statt, so ist die Amplitude bei meinem Schwingungsfigürchen = 200 micra; beim Ausklingen der Gabel steigt das Kreuz und deutet jede erreichte folgende Querlinie eine Abnahme von 20 μ an, bis an der letzten Querlinie beim Scheitel die Amplitude 20 μ erreicht ist. Jetzt erscheint unten an der Basis Gradenigos schwarzes Dreieck (Fig. c). Auch dieses steigt allmählich, wobei jede erreichte Querlinie eine Abnahme von 2 μ andeutet, bis bei der letzten Querlinie 2 μ erreicht ist."

„Beobachtung mit dem Mikroskop ist aber nicht nötig, denn wenn man am Ende der anderen Zinke eine kleine Linse befestigt, so daß sie gerade

1) Eine Modifikation derselben ist von Bloch publiziert worden in den Verhandlungen d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. (14. Versammlung in Homburg v. d. H.), Jena 1905, S. 108.

2) Bd. 46, S. 378ff.

3) Zu beziehen vom Instrumentenmacher Kagenaar in Utrecht.

über dem Figürchen eingestellt ist, so kann man auch hierdurch die Beobachtung bei 100facher Vergrößerung machen, wenn man die Gabel gegen das Licht hält, wie bei den bekannten mikrophotographischen Reproduktionen von Landschaften u. dgl. in Federhaltern usw."

„Hierbei wird aber die Amplitude in doppelter Größe observiert; denn wenn die eine Zinke mit der Mikrophotographie nach rechts schwingt, geht die andere mit der Linse nach links und vice versa. Die reale Amplitude wird also: Kreuz an der Basis 100 μ, an der mittleren Querlinie 50 μ; Gradenigos Dreieck an der Basis 10 μ, an der mittleren Querlinie 5 μ, an der letzten Querlinie 1 μ."

„Auf diese äußerst einfache Weise ist es also möglich, an der in der Hand gegen das Licht gehaltenen Stimmgabel in einem Gesichtsfelde die Amplituden bis auf 1 μ herab zu verfolgen, und man kann bis c^3 diese Abnahme und ihren Zusammenhang mit der erforderlichen Sekundenzahl ohne Okularmikrometer oder sonstige Hilfsmittel genau bestimmen."

Gabeln, die am zentralen Ende des Stieles zwischen zwei Fingern hängend gehalten werden, schwingen, wie erwähnt, nach Struycken hinreichend genau dem Dekrementgesetze entsprechend ab. Wenn z. B. die Zeit, während welcher die Amplitude sich von 100 μ auf 10 μ verringert, n Sekunden beträgt, so vergehen auch n Sekunden zwischen 10 μ und 1 μ, sowie von 1 μ bis 0,1 μ usw. Diese Zeit n, welche für die betreffende Gabel konstant bleibt und jeden Augenblick mittelst des Dreieckfigürchens bestimmt werden kann, nennt Struycken die Dezimierzeit.

Wartet man nun bei der Hörschärfeprüfung, bis die Amplitude auf 1 μ gesunken ist, und setzt in diesem Moment die Stoppuhr in Gang, so ist die Amplitude nach n Sekunden gleich 0,1 μ, nach $2n$ Sekunden gleich 0,01 oder $0{,}1^2$ μ, nach $3n$ Sekunden gleich $0{,}1^3$ μ, nach $x \cdot n$ Sekunden gleich $0{,}1^x$ μ. Hört daher der zu Untersuchende von der Amplitude 1 μ an gerechnet die Gabel noch t Sekunden, so daß man $x \cdot n = t$ und folglich $x = \frac{t}{n}$ setzen kann, so ist seine Schwellenamplitude gleich $0{,}1^{\frac{t}{n}}$ μ. Durch eine solche Kombination von Amplitudenablesung und Hördauermessung kann man also noch Schwellenamplituden mit praktisch genügender Exaktheit bestimmen, welche beliebige Bruchteile eines Mikromillimeters betragen.

F. H. Quix[1]) hat ein Dreieckfigürchen angegeben, dessen Basis 1000 μ lang ist, und besondere (stiellose) Gabeln dazu konstruiert, bei denen Figur und Lupe, jede mit einer der Zinken in fester Verbindung, sich wie bei den neueren Struyckenschen Gabeln im Zwischenzinkenraum befinden, um gegen Beschädigungen geschützt zu sein. Er will mit diesem Dreieck Amplituden von 1000 bis 1 μ ablesen, während in Wirklichkeit, wegen der Verdoppelung durch die gleichzeitige und entgegengesetzte Bewegung von Figur und Lupe, der maximale ablesbare Ausschlag 500 μ und die maximale Amplitude also 250 μ beträgt. Da Quix außerdem der Hörschärfeberechnung die physikalisch unhaltbare Voraussetzung, daß $H_p = \left(\frac{a_n}{a_p}\right)^{1,2} \cdot H_n$ sei, zugrunde legt,

1) Die Hörmessung mit Stimmgabeln; Zeitschr. f. Ohrenheilk. usw., Bd. 57, S. 228ff., 1909.

so erübrigt es sich, an dieser Stelle näher auf seine Methodik einzugehen.

Um die mancherlei Schwierigkeiten und Fehlerquellen, die der Hörschärfemessung mittelst Stimmgabeln anhaften, zu umgehen, hat E. Waetzmann[1]) eine Interferenzmethode vorgeschlagen, zu der er einen Apparat benutzt, wie ihn unsere Figur 68 auf S. 297 zeigt. Ein Teil der Nebenröhren dient dazu, die Schallquelle, als welche man am besten eine Tonflasche oder Lippenpfeife wählt, von Obertönen zu reinigen, und ein besonderes Seitenrohr ist zur Schwächung des für die Hörprüfung benutzten Grundtones bestimmt. Macht man den Querschnitt dieser Röhre in passendem Maße größer als jenen des Hauptrohres, so treffen bei jeder Einstellung derselben die beiden Tonwellenzweige im Momente der Interferenz mit der gleichen Intensität i zusammen, und es resultiert daraus die Gesammtintensität $I = 2i + 2i \cdot \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$, wenn δ der durch das Ausziehen der Seitenröhre bedingte Gangunterschied und λ die Wellenlänge ist[2]), oder $I = 2i\left(1 + \cos 2\pi \frac{\delta}{\lambda}\right)$. I ist ein Maximum und zwar gleich $4i$, wenn die Phasendifferenz Null oder ein gerades Vielfaches von π ist, dagegen ein Minimum und zwar gleich Null, sofern die Phasendifferenz ein ungerades Vielfaches von π beträgt. Zwischen diesen beiden Grenzwerten müssen die gesuchten Schwellenintensitäten I_p und I_n liegen. Nennen wir die ihnen entsprechenden Gangunterschiede δ_p respektive δ_n, so ist $I_p : I_n = 1 + \cos 2\pi \frac{\delta_p}{\lambda} : 1 + \cos 2\pi \frac{\delta_n}{\lambda}$, da ja der Faktor $2i$ sich durch Division weghebt, und hieraus ergibt sich die Hörschärfe $H_p = \frac{1 + \cos 2\pi \frac{\delta_n}{\lambda}}{1 + \cos 2\pi \frac{\delta_p}{\lambda}} \cdot H_n$.

Waetzmann empfiehlt, bei der Untersuchung eines schwerhörigen Ohres den Ton von vorneherein soweit zu schwächen, bis er für den Patienten bei der Phasendifferenz Null, also bei ganz bis ans Hauptrohr hineingeschobenem Stempel der Seitenröhre, eben noch hörbar ist, und dann an zweiter Stelle das normale Vergleichsohr mittelst weiterer Verminderung der Tonintensität durch Ausziehen des Stempels auf seine Schwellenintensität (I_n) zu prüfen. — Außerdem legt er besonderes Gewicht darauf, daß das Ohr in keinem Falle die Röhrenmündung direkt berührt, damit keine Tonüberleitung durch die Wandung stattfinden könne.

Ein Hauptvorzug der Waetzmannschen Methode ist der, daß bei ihr wirklich die Luftamplituden zur Messung kommen und nicht wie bei den Gabeln nur die Zinkenamplituden. Angenehm ist ferner, daß die Schwellenintensität beliebig lange dem Ohre zur ruhigen Beurteilung dargeboten werden kann. Dem gegenüber bestehen aber auch Nachteile. So macht die unbedingt erforderliche absolute Konstanterhaltung der Tonhöhe und

1) Verhandlungen d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. (19. Vers. in Dresden); Jena 1910, S. 90ff. und Zeitschr. f. Ohrenheilk. usw., Bd. 63, S. 145ff., 1911.

2) Vgl. Auerbach, Akustik; Bd. 2 des Handbuches d. Physik von Winkelmann, 2 Aufl., Leipzig 1909, S. 594.

namentlich der Tonstärke gewisse, nicht unerhebliche Schwierigkeiten, wovon schon früher die Rede war. Ein weiterer Übelstand liegt darin, daß die tiefen Töne, zum mindesten die der Edelmannschen Gabeln, an sich zu schwach sind, um durch irgend welche Röhrenleitungen hindurch überhaupt hörbar zu sein, und daß bei den höheren Tönen sich einerseits die Kürze der Wellenlängen, andererseits die Neigung zur Tonfortpflanzung in der Substanz der Röhrenwand störend bemerkbar macht.

Mit der Erfindung des Telephons als eines Instrumentes, durch welches man Töne von beliebiger Höhe und veränderlicher Stärke erzeugen kann, war zugleich auch die Grundlage für eine ganze Reihe elektrischer Hörprüfungs-Apparate[1]) gegeben.

Das den meisten Einrichtungen dieser Art gemeinsame Prinzip ist das, in einem galvanischen Strome Unterbrechungen oder Remissionen zu erzeugen und sie so auf den Magneten eines Telephons zu übertragen, daß dessen Schallplatte in Vibrationen von entsprechender Schwingungszahl gerät. Das Telephon wird dabei entweder in Form einer Nebenschließung mit dem primären Strom verbunden, oder man benutzt die Induktion, indem man wie beim Du Bois-Reymondschen Schlittenapparat den Hauptstrom durch eine primäre Spule gehen läßt und das Telephon mit der sekundären zusammenschaltet. Die Variation der Schallstärke des Telephons geschieht im ersteren Falle durch Veränderung der Stromintensität mittelst eines Rheostaten, im zweiten durch Wechseln der Distanz zwischen den beiden Spulen. (Bei dem Akumeter von Stefanini sind diese in fester Verbindung miteinander; man kann dafür aber eine beliebige und genau meßbare Anzahl Windungen der sekundären Rolle in die Kette des Telephons einfügen.) Als Unterbrecher dient in primitivster Form der Wagnersche Hammer, der jedoch sehr unreine Töne liefert. Empfehlenswerter sind Stimmgabeln oder Federn nach Art der Bernsteinschen Lamelle[2]). Oder aber man nimmt in die Primärstromkette ein Mikrophon auf, das etwa durch eine Stempelpfeife oder irgendeine andere passende Klangquelle erregt wird.

Von einem idealen elektrischen Hörschärfemesser wird man zu ver-

---

1) Hartmann, Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1878, S. 155. — Wodtke, Üb. Hörprüfung usw., Dissertation, Rostock 1878. — Hughes, Nature 1879, p. 77 u. 102. — W. Preyer, Jenaische Gesellsch. f. Med. u. Naturw., Sitzung v. 21. II. 1879. — Jacobson, Du Bois-Reymonds Arch. f. Physiol. 1888, S. 189. — Seashore, Univ. of Jowa Stud. in Psychol., Vol. 2, p. 158, 1899. — Gradenigo, Arch. f. Ohrenheilk., Bd. 30, S. 240, 1890; Giornale della R. Accad. di Med. di Torino, 1901, n. 3; Sulla acumetria, Siena, 1908. — N. Vaschide, De l'audiométrie, Bulletin de Laryngol. etc., Tome IV, Chap. 5, 1901. — Max Wien, Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. 97, S. 1 ff., 1903. — A. Stefanini, Acumetro telefonico a solenoide neutro, Il Nuovo Cimento, Ser. V, Vol. X, Fasc. di Agosto 1905. — P. E. Shaw, The Amplitude of the Minimum Audible Impulsive Sound; Proceed. of the Royal Society of London, 1905; Nature, Vol. 72, p. 503, 1905. [Verf. bestimmte mit seinem elektrischen Mikrometer direkt die Amplitude einer Telephonmembran bei minimalen und lauteren Geräuschen.] — H. Abraham, Sensibilité absolue de l'oreille; Comptes rendus etc., Tome 144, p. 1099, 1907. — Trétrop, Arch. internat. de Laryngol. etc., Tome 24, p. 504, 1907 u. 26, p. 157, 1908. — Raoult, ibidem, Tome 26, p. 525, 1908. — Ferreri, ibidem, Tome 27, p. 520, 1909. — Preysing, Verhandlg. d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. (18. Vers. zu Basel), Jena 1909, S. 216. — Brünings, Verhandlg. d. Deutsch. Otolog. Gesellsch. (22. Vers. zu Stuttgart), Jena 1913, S. 259.

2) S. oben S. 272.

langen haben, daß er möglichst reine und einfache Töne gibt, daß deren Schwingungszahl sich nach Bedarf wählen läßt, und daß die Tonstärke einerseits innerhalb hinreichend weiter Grenzen abzustufen, andererseits physikalisch exakt meßbar sei. Am besten scheint mir allen diesen Anforderungen das von Wien angegebene Instrumentarium zu entsprechen. Die Ströme, die möglichst sinusförmige Wechselströme sein mußten, um einfache Töne zu erzeugen, wurden für die tieferen Töne von einem Sinusinduktor, welcher ähnlich, nur größer, konstruiert war als der bekannte Kohlrauschsche, für die höheren von der oben[1]) beschriebenen Wechselstromsirene geliefert. Die Anordnung bei den Versuchen war folgende: Damit das Geräusch des Motors und der Sirene nicht störte, wurde der Strom in ein entferntes ruhiges Zimmer geleitet. Die Intensität im Hauptzweig konnte durch ein Dynamometer im Nebenschluß gemessen werden. Das Telephon lag in einer zweiten Nebenschließung zum Hauptzweig. Durch Veränderung von Widerständen ließ sich der Strom beliebig schwächen, bis die Reizschwelle erreicht war. Bei schwachem Strom ist der Ausschlag der Telephonplatte dem Strome proportional, die Tonintensität also proportional dem Quadrat der Stromamplitude und die Empfindlichkeit des Ohres für die jeweilige Schwingungszahl umgekehrt proportional dem Quadrat des Minimalstromes, der den Schwellenton erzeugt. Vorausgesetzt ist hierbei, daß der gehörte Ton tiefer ist als der erste Eigenton der Platte und daß die Länge des Gehörganges gegen die Wellenlänge zu vernachlässigen sei. Aus dem Umstande, daß bei Wiens Versuchen zur Messung der Tonintensität am Ohre das Telephon fest an den Kopf gedrückt wurde oder mit einem Deckel nebst Ansatzrohr zum Einführen in den Gehörgang versehen war, hat man den Einwand herleiten wollen, daß statt der Luftleitung allein vielmehr die gemeinsame Wirkung von Luft- und Knochenleitung bei den Schwellenbeobachtungen geprüft worden wäre; ich glaube, mit Unrecht. Denn wie ich neuerdings — übrigens in Übereinstimmung mit einer gelegentlichen Bemerkung von Gradenigo — im Verlaufe von Versuchen mit knackenden Telephongeräuschen fand, liegt die Schwelle ihrer Wahrnehmung bei Telephongehäuse-Ohrknorpel-Kopfknochen-Leitung sehr merklich höher als bei Luftleitung; der letzte hörbare Rest des Schalles eines ans Ohr gepreßten Telephons dürfte also doch von dessen Platte durch die Luft des Gehörganges auf das Trommelfell übertragen werden.

Bei der neuerdings von Brünings auf der 22. Versammlung der Deutschen Otologischen Gesellschaft in Stuttgart demonstrierten, ursprünglich ebenfalls von Max Wien vorgeschlagenen, Einrichtung zur Hörschärfemessung werden die Töne dadurch hervorgebracht, daß die gedämpften elektrischen Schwingungen von Kondensatorentladungen ein abgestimmtes Telephon erregen, dessen Platte zur weiteren Tonreinigung mit einem kugelförmigen Luftresonator gekuppelt ist. Die Abstufung der Intensität erfolgt durch einen in den sekundären Stromkreis gelegten Drehrheostaten, welcher Bruchteile der „normalen" Hörschärfe angibt. Die Einstellung der gewünschten Tonhöhe, welche bis über 5000 v. d. möglich ist, wird durch Änderung der Kondensatorkapazität und der Spulenschaltung bewirkt. Da

1) S. 284.

die ganze Apparatur außer einem Morsetaster keine beweglichen oder der Abnutzung unterworfenen Teile aufweist und direkt an die Starkstromleitungen angeschlossen werden kann, ist große Betriebssicherheit und stete Gebrauchsfertigkeit gewährleistet.

Die Unterschiedsempfindlichkeit für Tonintensitäten hat wiederum M. Wien[1]) untersucht an den Tönen a^0, e^1 und a^1. Als Tonquelle diente das Telephon. Die Abstufung der Intensität wurde in der Weise bewirkt, daß die Wechselströme vermittelst eines Umschalters das eine Mal durch einen, das andere Mal durch einen anderen Flüssigkeitswiderstand geschickt wurden, welche beliebig geändert werden konnten. Die Messung der physikalischen Intensität geschah mittelst des oben[2]) beschriebenen Wienschen Verfahrens, wobei die Amplitude der beiden zu vergleichenden Töne bis auf mindestens 0,5 Prozent mit Sicherheit gegeben war. Hauptsächlich wurde der Kammerton geprüft, und zwar nach der psychophysischen Methode der Minimaländerungen. Von der Reizschwelle an bis zu einer beträchtlichen Stärke hinauf wurden Intensitätsstufen gebildet, deren jede das Zehnfache der vorhergehenden betrug, und für jede derselben durch 40 Einzelversuche die eben merklich verschiedene Intensität aufgesucht. Die Resultate waren mit einem wahrscheinlichen Fehler von 15 bis 20 Prozent bei der einzelnen Einstellung behaftet; doch ergab sich im ganzen ein annäherndes Zutreffen des Fechnerschen Gesetzes.

b) Bei Geräuschen.[3])

Um ein Geräusch von variabler Stärke bei möglichst gleich bleibender

1) Über die Messung der Tonstärke; Berliner Dissertation, 1888 u. Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 36, S. 843ff., 1889. — Eine weniger exakte Methodik hat Zwaardemaker angegeben (Sitzung d. Kgl. Akademie d. Wissensch. zu Amsterdam vom 28. Okt. 1905).

2) S. 350 f.

3) Literatur zu diesem Kapitel: Schafhäutl, Abhandlg. d. Math.-Phys. Cl. d. Kgl. Bayrischen Akad. d. Wiss., Bd. 7, S. 499, München 1855. — G. Th. Fechner, Elemente d. Psychophysik (1. Aufl. 1859—60), 2. Aufl., Teil 1, S. 175ff. und Revision d. Hauptpunkte d. Psychophysik, S. 367ff., 1882. — K. Vierordt, Zeitschr. f. Biologie, Bd. 14, S. 300, 1878 und Bd. 17, S. 361, 1881; Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 18, S. 471, 1883 und Bd. 21, S. 509, 1884. Zusammenfassende Darstellung in: Die Schall- und Tonstärke und das Schalleitungsvermögen der Körper, Tübingen 1885. — C. Nörr, Zeitschr. f. Biologie, Bd. 15, S. 297, 1879. — A. Oberbeck, Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 13, S. 222, 1881. — E. Tischer, Leipziger Dissertation, 1882 und Wundts Philos. Stud., Bd. 1, 1883 (2 Teile). — W. Wundt, Wundts Philos. Stud., Bd. 1, S. 1, 1883 und Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 18, S. 695, 1883. — G. Lorenz, Wundts Philos. Stud., Bd. 2, S. 394 u. 655, 1885. — P. Starke, ebenda, Bd. 3, S. 264, 1886 und Bd. 5, S. 157, 1889. — J. Merkel, ebenda, Bd. 4, S. 117 u. 251, 1888. — F. Angell, ebenda, Bd. 7; auch Leipziger Dissertation 1891. — B. Kämpfe, Wundts Philos. Stud., Bd. 8, S. 511, 1893. — E. Mosch, ebenda, Bd. 14, S. 491, 1898. — G. A. Hoefer, Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 36, S. 269, 1904. — W. Wundt, Grundzüge d. Physiolog. Psychologie, 6. Aufl., Bd. 1, S. 650, Leipzig 1908. — O. Zoth, Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol., Bd. 124, S. 157, 1908 und Bd. 137, S. 545, 1911. — F. Auerbach, Akustik; Bd. II d. 2. Aufl. d. Winkelmannschen Handbuches d. Physik, S. 229ff., 1909. — Bezüglich der Beschreibung und Abbildung der Fallphonometer von Krueger, Lehmann und anderen sei auf den Katalog der Präzisionsmechanischen Werkstatt von E. Zimmermann, Leipzig, Emilienstr. 21, u. Berlin, N 4, Chausseestr. 6, verwiesen.

Qualität[1]) zu erzeugen, hat man von jeher das Prinzip benutzt, eine Kugel entweder von oben herab auf oder von seitwärts gegen einen festen Körper fallen zu lassen. Apparate ersterer Art sind die Fallphonometer; die zweite Form repräsentiert das Schallpendel.

Die Fallphonometer bestehen, in den wesentlichen Punkten übereinstimmend, in Einzelheiten mannigfach verschieden, aus drei Hauptteilen, nämlich aus einer stabilen vertikalen Führungsstange, die als Träger des Kugelhalters dient, aus diesem selbst und aus der „Schallplatte", welche, durch die fallende Kugel in Erschütterung versetzt, das zu beobachtende Geräusch abgibt. Des weiteren kommt öfter noch irgendeine Vorrichtung zur Konstanterhaltung des Abstandes zwischen Ohr und Auftreffpunkt der Kugel hinzu.

Um die Fallhöhe genau messen zu können, was von besonderer Wichtigkeit ist, hat man meist die Führungsstange graduiert und den an ihr auf- und abwärts verschieblichen, nach der Einstellung durch eine Schraube zu fixierenden, wagerechten Arm für den Kugelträger auch wohl noch mit einem Nonius versehen. Schafhäutl befestigte an dem wagerechten Arm eine vertikal gestellte Pinzette, welche die Kugel zwischen ihren Spitzen solange festhielt, bis die Branchen durch einen seitlichen Druck auseinander gedrängt wurden. Bei dem Apparat von Vierordt, mittelst dessen auch Nörr seine Versuche über die Unterschiedsempfindlichkeit für Schallstärken ausführte, war die Pinzette horizontal gerichtet. Ihre Enden hatten die Form einer Viertelhohlkugel, so daß die ebenfalls nur beim Zusammendrücken ihrer Branchen sich vorn öffnende Pinzette im geschlossenen Zustande in eine Halbhohlkugel mündete, wohinein die Fallkugel vor dem Versuche gelegt wurde. Wohl nicht ganz mit Unrecht bemängelt Starke diese Einrichtung, bei der die Fallhöhe nicht gleichmäßig genau meßbar und keine genügende Gewähr dafür vorhanden sei, daß die Kugel mit der Anfangsgeschwindigkeit Null und ohne Drehungen zu fallen beginne. Bei der Untersuchung von Tischer wurden daher auch die Fallkugeln einfach zwischen zwei Fingern, die auf dem Rande einer kreisrunden Öse ruhten, gehalten und dann unter vorsichtigem Öffnen der Finger durch die Öse fallen gelassen. Ganz besonders exakt aber funktioniert in dieser Beziehung der Wundtsche Fallapparat. Hier wird die Kugel unter sorgfältiger Einstellung zwischen zwei vertikale Platten geklemmt, von denen die eine durch elektromagnetische Anziehung gegen die Kugel gepreßt und nach der Öffnung des Stromes mittelst Hebelwirkung von ihr abgezogen wird, worauf deren Fall beginnt.[2]) Die Verwendung des elektrischen Stromes bietet hier den weiteren Vorteil, daß man zwei oder drei Kugeln hintereinander in zeitlich genau bestimmbaren und durchaus konstant zu erhaltenden Pausen fallen lassen kann. Diese Aufgabe erfüllt ein in den Stromkreis geschaltetes Kontaktpendel von

1) Das Timbre der Geräusche läßt sich kaum ganz unabhängig von der Intensität machen, was damit zusammenhängt, daß wir es hierbei mit komplizierten und leicht veränderlichen Gemengen von Tonwellen zu tun haben.

2) Zoth (der übrigens auch einen pneumatischen Kugelhalter benutzt hat) und andere lassen Stahlkugeln direkt vom Anker des Elektromagneten herabfallen. — Ein mechanisches Gegenstück zu der elektrischen „Fallzange" Wundts hat Merkel konstruiert (a. o. O. S. 137 ff.).

variabler Schwingungsdauer, das jedesmal beim Passieren der Gleichgewichtslage die Öffnung eines Kontaktes bewirkt und so in gleichen Zeitabständen zwei, drei oder auch alle vier Kugelhalter des Wundtschen Apparates auszulösen vermag.

Als Material für die Fallkugeln wählte Schafhäutl bei seinem Versuch einer Bestimmung des Minimum perceptibile Kork, sodann aber auch Blei. Die späteren Autoren gebrauchten außer Bleischroten Kugeln von Elfenbein, Eisen oder Messing. Je elastischer die Substanz ist, desto leichter springt die Kugel von der Schallplatte zurück. Um ein mehr als einmaliges Aufprallen auf die Platte zu vermeiden, hat man daher dieser zuweilen eine schräge Lage gegeben oder sonst dafür gesorgt, daß die Kugeln unmittelbar nach dem Aufschlagen in einen ausgepolsterten Kasten fallen.

Die Schallplatten liefern, je nachdem sie von Glas, Schiefer, Eisen, Zinn oder hartem Holz sind, eine wechselnde Klangfarbe des Geräusches, wobei es auch einen Unterschied macht, ob sie auf Füßen stehen oder etwa fest auf einer Tischplatte ruhen. Gegen störende Resonanzerscheinungen haben sich Filzunterlagen als nützlich erwiesen. Ein Übelstand besteht aber darin, daß zwei Kugeln, die man zum Vergleich nacheinander auf getrennte Schallplatten fallen läßt, leicht ein verschiedenes Timbre geben, selbst wenn die beiden Schallplatten von gleicher Substanz sind. Sogar zwei distinkte Punkte einer und derselben Platte differieren oft hinsichtlich der Klangfarbe. Tischer ließ deswegen die Kugeln durch vertikal übereinander angebrachte Ösen auf den gleichen Punkt der Platte fallen, während Angell vor den Versuchen durch probeweises Anklopfen Stellen von qualitativ übereinstimmender Klangfarbe auf seinem Schallbrette ausfindig machte. Wundt empfiehlt neuerdings im Interesse möglichster qualitativer Gleichheit der Geräusche, wenn irgend angängig, sowohl den Normalreiz als auch den Vergleichsreiz mittelst einer und derselben Kugel wie Platte herzustellen.

Wie man sieht, ist die scheinbar so einfache Technik, mittelst eines Fallphonometers ein ebenmerkliches oder zwei ebenmerklich verschieden laute Geräusche zu erzeugen, mit mancherlei Umständlichkeiten verknüpft. Die bei weitem größte Schwierigkeit liegt indessen in den Prinzipien der Schallstärkeberechnung. Während Schafhäutl ohne weiteres die sogenannte Bewegungsgröße als Maß der Intensität nahm, letztere also proportional dem Produkt aus Gewicht und Quadratwurzel der Fallhöhe setzte, hat Fechner in seinen „Elementen der Psychophysik“ ebenso selbstverständlich die Schallstärke als proportional der lebendigen Energie betrachtet, mit der die Kugel die Platte trifft, d. h. proportional dem Produkt aus Gewicht und Fallhöhe. Vierordt kam in seinen ausgedehnten psychophysischen Versuchen zu einer experimentellen Bestätigung der Schafhäutlschen Auffassung. Er fand, in guter Übereinstimmung mit den von Oberbeck nach einer ganz anderen, nämlich objektiv-physikalischen, Methode gewonnenen Resultaten, daß die Fallhöhe mit einem Exponenten ε zu versehen sei, der zwar im Durchschnitt etwas größer als 0,5 war, aber doch den von Fechner postulierten Wert $= 1$ ganz und gar nicht erreichte. Die im Literaturvermerk oben erwähnten Schüler Wundts haben es sich zum Teil angelegen sein lassen, dieses ε unter verschiedenen Variationen der Fallhöhen h, der Kugelgewichte p und der Schallplatten zu bestimmen. Im ganzen wird man

aus ihren Arbeiten den Schluß zu ziehen haben, daß es ein einheitliches Schallmaß von der Formel: I proportional $p \cdot h^{\varepsilon}$, worin ε eine konstante Größe, nicht gibt. Der Betrag von ε schwankte je nach den Versuchsbedingungen zwischen ca. 0,5 und 1, und auch eine Proportionalität von I und p ist in Abrede gestellt worden. Man wird daher bei weiteren Studien über die Beurteilung von Geräuschintensitäten von Fall zu Fall empirisch versuchen müssen, ein Schallmaß von der Form: I proportional $p \cdot h^{\varepsilon}$ oder proportional $p^{\eta} \cdot h^{\varepsilon}$ zu ermitteln[1]).

Eine Ursache dafür, daß I nicht proportional dem Produkt aus Gewicht und Fallhöhe ist, könnte darin erblickt werden, daß, wie auch schon Fechner selbst in seiner „Revision der Hauptpunkte der Psychophysik" anerkannt hat, eben nicht die gesamte lebendige Energie sich in Schall verwandelt, sondern ein gewisser Teil derselben zur Deformation von Kugel und Unterlage, zum Zurückschnellen der Kugel etc. verbraucht wird. Andererseits scheint mir in diesem Zusammenhange auch der von Auerbach a. a. O. entwickelte Gedankengang sehr beachtenswert, wonach als Maß der Bewegung bei Impulswirkungen die Bewegungsgröße, bei Dauerwirkungen die kinetische Energie in Betracht kommt, insofern beide Größen zueinander in der Beziehung wie eine Größe zu ihrem Integral stehen gemäß dem Umstande, daß es sich bei der Dauerwirkung um eine Integration der Momentanwirkung über eine endliche Zeit handelt. Ziehe man, sagt Auerbach, die Nutzanwendung auf den Schall, so folge, daß das Intensitätsmaß eines momentanen Knalles die Bewegungsgröße, das Maß der Stärke eines andauernden Schalles aber die kinetische Energie sei, und daß man, wo diese Begriffe des Knalls und Schalls ineinander übergehen, in gewissen Fällen auch Übergangsformeln zu erwarten haben werde. Als solche Übergänge dürften die ε-Werte zwischen 0,5 und 1 zu betrachten sein, und Auerbach findet es auch bei richtiger Interpretation einiger Versuche der früheren Autoren sowie auf Grund eigener gelegentlicher Experimente bestätigt, daß die Beträge von ε um so größer werden, je länger der Schall andauert.

Das Schallpendel wurde zuerst von Volkmann bei seinen Versuchen mit Fechner über die Unterschiedsempfindlichkeit für Schallstärken konstruiert und hat im wesentlichen seine ursprüngliche Form auch später behalten. Das Prinzip des Apparates ist äußerst einfach. Auf einem schweren eichenen Brette, das als Unterlage dient, erhebt sich eine, an ihrem oberen Ende mit einem Querbalken versehene Säule. An dem Querbalken hängt die leichte Pendelstange, welche längs eines Gradbogens bis zur horizontalen Lage gehoben werden kann. Unten an ihr ist eine Kugel aus Hartgummi befestigt, und diese schlägt, wenn man das Pendel fallen läßt, gegen

---

1) Vgl. hierzu besonders J. Merkel a. o. O. — Vierordt leitete den numerischen Wert von ε aus der Formel $I : I_1 = p \cdot h^{\varepsilon} : p_1 \cdot h_1{}^{\varepsilon}$ ab, indem er ein größeres Gewicht P aus einer kleineren Höhe h und ein kleineres Gewicht p aus einer größeren Höhe H fallen ließ und die vier Größen P, p, H und h so lange gegeneinander abstufte, bis die zugehörigen Schallstärken I und I_1 gleich erschienen. Aus $I = I_1$ folgte dann $P \cdot h^{\varepsilon} = p \cdot H^{\varepsilon}$ und daraus wieder $\varepsilon = \dfrac{\log \frac{P}{p}}{\log \frac{H}{h}}$.

einen massiven, mit dem Grundbrette fest verbundenen Ebenholzblock. Das Instrument wird meist als Doppelpendelapparat, also mit zwei, symmetrisch rechts und links von der Trägersäule und dem Ebenholzblock angebrachten Pendeln und Gradbogen, gebaut. In der Ruhelage berühren dann die Kugeln die einander parallelen Seiten des Schallblockes. An jedem der Gradbogen befindet sich ein Schieber, der sich auf eine beliebige Höhe einstellen läßt und zur Aufnahme der Pendelstange eine Rinne besitzt. Letztere dient als Fallhöhenmarke: man führt das Pendel mit der Hand gegen die Rinne und läßt es fallen. Um ein zweites Anschlagen der Kugel nach dem Rückprall zu verhüten, ist ein tasterartiger Kugelfänger vorhanden; man kann aber statt dessen auch die eigene Hand benutzen. Zum Zwecke der Schalldämpfung pflegen die Pendelstangen noch mit einer Hülle von Watte oder Filz umgeben zu sein.

Das Doppelpendel hat den Vorteil, daß man bei Versuchen über die Unterschiedsempfindlichkeit für Schallstärken nach vorheriger Fixierung der Fallhöhen die beiden zu vergleichenden Schalle unmittelbar aufeinander folgen lassen kann, während bei der Verwendung nur eines Pendels und einer Höhenmarke die Einstellung der zweiten Fallhöhe einen Aufenthalt verursacht. Da aber das Doppelpendel ungleiche Klangfarben der Geräusche ergibt, so ist Kämpfe in seiner oben zitierten Untersuchung zum Ein-Pendel-Apparat zurückgekehrt und hat dabei eine besondere Einrichtung getroffen, um auch an dem einen Gradbogen vor dem Versuch beide Höhen markieren zu können.

Bei einem Schallpendel von der hier beschriebenen Gestalt verhalten sich zwei Schallstärken nach der Fechnerschen Auffassung, die auch B. Kämpfe vertritt, wie die Fallhöhen, da ja das Gewicht immer das gleiche ist[1]). Die Fallhöhen verhalten sich aber ihrerseits zueinander wie $1 - \cos\varphi : 1 - \cos\varphi_1$, wenn φ und φ_1 die zugehörigen Elevationswinkel sind. Bei dem speziell von Vierordt für seine Versuche benutzten Schallpendel fällt ein in der Ruhelage horizontal gerichtetes Pendel auf eine wagerechte Schallplatte. Alsdann verhalten sich die Fallhöhen wie die Sinus der Elevationswinkel. Jedoch hat Vierordt auch für diesen Fall nach seinen Experimenten die These aufgestellt, daß der Fallhöhe noch ein Exponent $\varepsilon =$ ca. 0,6 zukomme, wonach also zwei zu vergleichende Schallstärken im Verhältnis von $\sin\varphi^{0,6} : \sin\varphi_1{}^{0,6}$ zueinander stehen würden.

Bei der Unmöglichkeit, im einzelnen Falle präzise festzustellen, wieviel von der kinetischen Energie, mit der ein kugelförmiger Körper auf eine Unterlage fällt, in Schall umgesetzt wird, und welcher Bruchteil von diesem Schall, über dessen Ausbreitungsweise im Raume wir nichts Genaues wissen, das mehr oder weniger weit von der Schallquelle entfernte Ohr erregt, läßt sich, mindestens gegenwärtig, die absolute physikalische Reizgröße für das Minimum perceptibile eines das Trommelfell treffenden Geräusches aus dem Gewicht und der Fallhöhe der Kugel rechnerisch nicht ableiten. Wohl aber ist eine relative Messung, die Vergleichung zweier solcher Minima, und damit auch eine Hörschärfeprüfung für Geräusche möglich.

---

1) Die Reibung an der Pendelachse und der Luftwiderstand werden hierbei als verschwindend gering betrachtet.

Benutzt man in einer und derselben Versuchsreihe immer das gleiche Gewicht und die gleiche Schallplatte und sorgt auch sonst für Gleichheit der Beobachtungsbedingungen, so kann man wohl mit leidlicher Annäherung $I_n : I_p = h_n^\varepsilon : h_p^\varepsilon$ setzen oder $H_p = \left(\frac{h_n}{h_p}\right)^\varepsilon \cdot H_n$, wobei H und I wieder wie früher die Hörschärfe bezw. die entsprechende Schwellenintensität bedeutet und ε für jede Versuchseinrichtung besonders zu ermitteln wäre. Indessen wird man Hörschärfemessungen dieser Art einen irgendwie erheblichen wissenschaftlichen Wert kaum zubilligen dürfen. Denn die Geräusche sind ihrem Wesen nach zu wenig klar definierbar; auch haben sie die ungünstige Eigenschaft, daß oft schon geringe Änderungen ihrer Entstehungsursachen Schwankungen in der Qualität herbeiführen. Ist überdies die von manchen Autoren gehegte Meinung, die Geräusche seien lediglich komplizierte Tongemenge, zutreffend, so erwächst schon daraus die Forderung, zu Hörschärfeprüfungen nur reine, einfache Töne zu verwenden. Benutzt man doch auch keine musikalischen Akkorde zur Bestimmung von Intensitätsschwellen.

Eine ganz andere Aufgabe von ungleich größerer wissenschaftlicher Dignität ist es, qualitativ gleiche, quantitativ eben unterscheidbare Geräusche herzustellen und an dem Verhältnis der zugehörigen physikalischen Reizgrößen die Gültigkeit des Weberschen Gesetzes von der Konstanz der relativen Unterschiedsschwelle zu prüfen, wie dies namentlich seitens der Wundtschen Schule in weitem Umfange geschehen ist. Denn hierbei kommt es nicht sowohl auf die speziellen akustischen Eigenschaften der Reize an als darauf, daß es sich um gleichartige Reize irgendeiner Qualität handelt.

5. Kürzeste Töne. Anklingen der Tonempfindung.

Nachdem im Vorstehenden die Methoden zur Untersuchung der Grenzen unserer Tonwahrnehmung in bezug auf Höhe, Stärke und Unterschiedsempfindlichkeit beschrieben sind, ist in diesem Zusammenhange nun noch die Ermittelung der Dauerschwelle zu erörtern, wobei es sich also um die Frage handelt, wieviel Schwingungen eines Tones mindestens zum Ohre gelangen müssen, damit derselbe seiner Qualität nach erkennbar sei.

Zur Lösung dieses Problems bieten sich zwei Wege dar. Entweder kann man die Dauer des Tones selbst sukzessive solange verkürzen, bis die Empfindung undeutlich wird bezw. verschwindet; oder man benutzt eine andauernd tönende Klangquelle und richtet die Zuleitung zum Ohre so ein, daß der Ton immer nur während einer gewissen, meßbaren und beliebig zu verkleinernden Zeit vernehmlich ist.

Das erstere Verfahren hat schon Savart[1]) eingeschlagen. Im Anschluß an seine Versuche mit den Zahnradsirenen über höchste hörbare Töne konstruierte er ein Rad mit „beweglichen“ Zähnen, die sich je nach Bedarf wegnehmen und wieder einsetzen ließen. Man durfte, welches auch die Zahl der anfänglich einen vollen Kranz bildenden Zähne und wie groß immer die Rotationsgeschwindigkeit sein mochte, mit anderen Worten bei allen möglichen Schwingungszahlen stets sämtliche Zähne bis auf 2 beseitigen, ehe

1) Annales de chimie et de physique, tome 44, p. 346, 1830.

der Ton bei aufmerksamer Beobachtung seinen spezifischen Höhencharakter verlor.

Ähnliche Versuche hat an einer Art Opeltscher Sirene Pfaundler[1]) ausgeführt. Er benutzte zunächst eine Scheibe mit 9 konzentrischen Löcherreihen. Die erste (äußerste) derselben hatte 72 gleich große und gleich weit voneinander abstehende Öffnungen. Bei der zweiten fehlte jedes 9. Loch, so daß sie aus 8 Perioden von je 8 Löchern und 1 Pause gebildet war. Bei der dritten folgten auf je 7 Löcher 2 Pausen, und so verringerte sich die Zahl der Löcher bei den weiteren Reihen immer um je 1 pro Periode, bis die 9. Reihe nur noch aus 8, durch je 8 Pausen getrennten, Öffnungen bestand, deren Distanz voneinander also 9 mal so groß war wie der Abstand der Löcher in der ersten Reihe. Bei sukzessivem Anblasen ergaben Reihe 1 und 9 reine Töne, deren ersterer der 8. Oberton des letzteren war; bei Reihe 1 hörte man nichts von Ton 9 und umgekehrt. Die zwischenliegenden Reihen ließen beide Töne zugleich, und zwar den Ton 1 um so undeutlicher, den Ton 9 dagegen um so deutlicher hören, je mehr man sich der 9. näherte. Bei Reihe 8, in der sich die Periode nur noch aus 2 Löchern zusammensetzte, war der Ton 1 bereits nicht mehr wahrzunehmen. Da Pfaundler indessen vermutete, er würde bloß durch den Ton 9 und das Scheibengeräusch verdeckt, konstruierte er noch eine zweite Sirenenscheibe von etwas anderer Form.

Bei dieser waren ebenfalls 9 konzentrische Löcherkreise vorhanden und hatte der äußerste 72 Öffnungen. In der zweiten Reihe fehlte aber immer das 3. Loch, so daß bei jeder Umdrehung die 24malige Wiederkehr einer Periode von 2 Löchern mit nachfolgender Pause stattfand. Auch bei den folgenden Kreisen bestand die Periode stets aus zwei Löchern, nur daß die Pausen von Reihe zu Reihe größer wurden. Bei dieser Anordnung resultierte, passende Rotationsgeschwindigkeit vorausgesetzt, der Ton der Reihe 1 auch beim Anblasen der Reihen 2 und 3, woraus Pfaundler mit einem, gleich näher zu erwähnenden, Vorbehalt folgern zu dürfen glaubte, daß bereits zwei Impulse eine wohl charakterisierte Tonempfindung auszulösen imstande seien, falls sie sich nur oft genug wiederholten.

Schließlich wurde noch eine dritte Versuchseinrichtung benutzt, bei der bloß eine einzige Löcherreihe, dafür aber zwei Anblaseröhren zur Verwendung kamen, von denen die eine dauernd feststand, während die andere längs der Löcherreihe verschieblich war. Ist die Distanz der beiden Röhrenmündungen sehr viel kleiner als der Abstand, in welchem die Löcher aufeinander folgen, so gibt zunächst jede Röhre für sich mit der Scheibe einen Ton, dessen Schwingungszahl gleich der Löcherzahl multipliziert mit der Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde ist; außerdem erzeugt aber jedes Loch bei der Passage der beiden sehr nahe beieinander liegenden Röhren einen Doppelschlag von beträchtlich höherer Tonlage. Die Schwingungszahl dieses, Loch für Loch sich wiederholenden Doppelimpulses ist offenbar eine Funktion der Röhrendistanz und muß sich also stetig ändern, wenn man die bewegliche Röhre während des Blasens verschiebt. In der Tat

1) Sitzungsber. d. Math.-Naturw. Cl. d. Kais. Akad. d. Wissensch. zu Wien, Bd. 76, 2. Abtlg., S. 561, Sitzung v. 8. Nov. 1877.

vernahm Pfaundler solche Tonhöhenänderungen und erblickte darin den entscheidenden Beweis für die Hörbarkeit eines öfter wiederkehrenden Tones von nur zwei Schwingungen.

In Wirklichkeit ist indessen eine mehrfache Aufeinanderfolge der Zwei-Löcher-Periode durchaus nicht notwendig. Abraham und Brühl[1]) haben dies bei ihren, im Prinzip den Pfaundlerschen übrigens ziemlich gleichen Versuchen an einer großen Seebeckschen Scheibe ausdrücklich konstatiert: Abraham konnte mit Hilfe seines vorzüglich entwickelten absoluten Tonbewußtseins schon bei dem erstmaligen Vorbeigehen der zwei Löcher ein sicheres und durch das Anblasen einer Kontrollreihe leicht zu bestätigendes Urteil über die Tonhöhe abgeben.

Es muß vielmehr betont werden, daß eine häufigere Wiederholung der Periode geradezu einen Versuchsfehler schwerwiegender Art bedeutet. Über jenen Löcherkranz mit 72 Öffnungen, von denen er jede dritte ausfallen ließ, äußerte sich bereits Pfaundler selbst dahin, derselbe gäbe vielleicht nur deswegen den gleichen Ton wie die volle Reihe, weil die Pause von den Nachschwingungen der resonierenden Teile im Ohre überbrückt werde. Man braucht aber gar nicht erst das Physiologische zu berücksichtigen. Das Bedenkliche liegt schon in den physikalischen Verhältnissen. Eine Löcherreihe, wie die eben erwähnte, liefert nämlich eine komplizierte Klangwelle, deren Analyse nach Fourier pendelförmige Komponenten von lückenlosen Wellenzügen ergibt[2]). Dem Ohre werden also in solchem Falle überhaupt gar keine objektiv aus nur 2 Impulsen bestehenden Töne dargeboten.

Kohlrausch[3]) hat Savarts Versuche erneuert und zwar in einer Form, durch welche von vorneherein vermieden wurde, daß die zu beurteilende Periode sich wiederholte. Er ließ ein Pendel mit einem Stück Zahnrad, dessen Radius gleich der Pendellänge war, aus einer bestimmten Höhe fallen und durch das Anschlagen der Zähne an ein Kartenblatt die gewünschte Anzahl von Impulsen entstehen. Das Pendel war eine stark beschwerte, von der Zimmerdecke herabhängende Stange, die vor dem Versuch seitlich an einer leicht auslösbaren Hakenvorrichtung aufgehängt wurde. Unten am Pendel war in der Schwingungsebene eine vertikale Blechplatte mit äquidistanten Löchern zum Anschrauben der Zähne befestigt. Das aufrecht und senkrecht zur Schwingungsebene in einem Holzblock fixierte Kartenblatt konnte mittelst eines Schlittens unter das Pendel oder aus dessen Bereich heraus geschoben werden. Zwecks objektiver Bestimmung des Tones der Zähne wurde die Bewegungsgeschwindigkeit des Pendels in unmittelbarer Nähe seiner tiefsten Lage, bei welcher es über das Kartenblatt streifte, aus der Fallhöhe berechnet und auch noch mittelst des Hippschen Chrono-

1) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 18, S. 177 ff., 1898.

2) Vgl. hierzu das Kapitel über „Die Variations- und sog. Unterbrechungstöne" aus meinem Artikel „Gehörssinn" in Nagel's Handbuch d. Physiologie, Braunschweig 1905, S. 532 f. sowie F. A. Schulze: „Die Übereinstimmung der als Unterbrechungstöne bezeichneten Klangerscheinungen mit der Helmholtzschen Resonanztheorie"; Ann. d. Phys. (4), Bd. 26, S. 217, 1908 und „Zur Resonanztheorie des Hörens; Phasenwechseltöne; Pfaundlersche Töne; Bewegungstöne"; Berichte d. Marburger Gesellsch. z. Beförderung d. ges. Naturw., Sitzung vom 19. II. 1913.

3) Wiedemanns Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 10, S. 1 ff., 1880.

skopes kontrolliert. Der Pendelton, dessen Höhe sich je nach der Fallgeschwindigkeit und der etwas variablen Zahndistanz zwischen den Schwingungszahlen 81,4 und 244,2 bewegte, ward außerdem von dem Beobachter mit einem möglichst exakt geeichten Monochord in der Weise verglichen, daß die Schwingungszahl des eben merklich höheren und die des eben merklich tieferen Monochordtones aufgesucht wurde, zwischen denen dann der Pendelton in der Mitte lag. Von anfänglich mehr als 16 Zähnen ausgehend, ließ man letzteren durch folgeweises Abschrauben der äußeren Zähne von Versuch zu Versuch kürzer werden, wobei sich wiederum ergab, daß selbst 2 Impulse noch einen mit dem Monochord durchaus vergleichbaren Ton hervorrufen. Bemerkenswert ist, daß bei dieser Methodik zugleich eine Prüfung der Tonhöhen-Unterschiedsempfindlichkeit unter der besonderen Bedingung der exzessiven Kürze eines der Töne vorgenommen wird. Die mancherlei Fehlerquellen des Verfahrens, von denen hier nur die Hemmung des Pendels durch den Widerstand des Kartenblattes sowie der Umstand erwähnt sei, daß die Fallgeschwindigkeit der Zähne und damit die Tonhöhe vom ersten bis zum mittelsten Zahn etwas wächst, um dann wieder abzunehmen, wurden sorgfältig in Rechnung gezogen. Sie hatten auf das Hauptresultat keinen Einfluß.

Die Herstellung sehr kurzer Töne durch Unterbrechung der Zuleitung zum Ohre bewerkstelligte E. Mach[1]) auf folgende Art. In einem Kasten mit doppelten Wänden, deren Zwischenraum mit Sägespänen ausgefüllt war, befand sich eine elektrische Stimmgabel, eine Zungenpfeife oder sonst ein Instrument, welches von außen leicht erregt werden konnte. Aus diesem Kasten drang der Ton durch ein gegabeltes Rohr heraus. Der eine Zweig führte zu einer Koenigschen manometrischen Flamme; der zweite ging dicht bis an eine Pappscheibe heran und auf ihrer anderen Seite weiter zum Beobachter. Die Pappscheibe, welche sich wie eine Sirene drehen ließ, hatte einen radialen Ausschnitt von variabler Winkelbreite und trug einen gegen die Achse geneigten Spiegel, in den man durch den Ausschnitt hineinsehen konnte. Wurde sie in Rotation versetzt, so hörte man den Ton nur während der kurzen Zeit, in der der Ausschnitt das Rohr passierte, und vermochte zugleich, wenn das Auge nahe vor die Scheibe gebracht ward, an den Flammenbildern im Spiegel zu zählen, wieviel Schwingungen vernommen wurden. Ein Ton von 256 einfachen Schwingungen, also c^0, war erst bei 4 bis 5 Schwingungen als Ton von bestimmter Höhe erkennbar, bei 2 bis 3 Schwingungen gab er bloß einen trockenen Schlag. Bei tiefen Tönen traten die Obertöne noch deutlich hervor, wenn der Grundton wegen zu großer Kürze bereits verschwunden war.

Villari und Marangoni[2]) verkürzten den an sich kontinuierlichen (Gabel-)Ton durch Verschluß des die Leitung vermittelnden Kautschukrohres; ebenso Exner[3]). Letzterer stellte vor einer elektrischen Gabel einen Kugelresonator auf, von welchem aus der Ton durch einen Gummi-

1) Physikalische Notizen; 2. Ein neuer akustischer Versuch; Lotos, 23. Jahrg., S. 146, Prag 1873.

2) Il nuovo Cimento, vol. 28, (2), I, p. 382—398, 1868/69.

3) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. 13, S. 232 ff., 1876.

schlauch auf das Ohr der Versuchsperson, die sich in einem entfernten Zimmer befand, übertragen wurde. Der Schlauch ging durch einen länglichen, rechteckigen Rahmen, welcher nach Art des Gewichtes der bekannten Atwoodschen Fallmaschine aufgehängt war. Im aufgezogenen Zustande preßte der Rahmen mit seinem unteren wagerechten Balken den Schlauch von unten her zu. Ließ man den Rahmen fallen, so öffnete sich der Schlauch und blieb frei, bis der auf ihn fallende obere Rahmenbalken wieder den Verschluß bewirkte. Die Fallgeschwindigkeit konnte nach dem Prinzip der Fallmaschine variiert werden, und besondere Messungen zeigten, daß die Fallzeiten bei gleicher Belastung sehr konstant waren. Mit 1 Schwingung beginnend und die Zahl sukzessive vermehrend, wobei die Fallzeiten durch eine in Ruß schreibende Stimmgabel registriert wurden, fand Exner, daß c^0 bei 17, C bei 16,8 Schwingungen zuerst eine Tonempfindung von deutlich erkennbarer Höhe gab. Eine gewisse Schwierigkeit erwächst indessen dieser Methodik daraus, daß durch das Auseinanderspringen der zusammengepreßten Schlauchwandungen eine relativ beträchtliche „Talwelle" entsteht, die den Tonwellen vorangeht und ziemlich intensiv als dumpfer Stoß perzipiert wird. Die Vermutung, daß dadurch die eigentliche Tonwahrnehmung gestört oder die Aufmerksamkeit abgelenkt werde, liegt nahe, und was Exner zur Widerlegung dieses Einwandes anführt, ist keineswegs stichhaltig.

Rudolf Schulze benutzte bei seinen Versuchen über Klanganalyse[1]) ebenfalls einen Gummischlauch als Übertragungsrohr für die Töne. Um diese in beliebiger Dauer und genau abgegrenzt herzustellen, war in die Leitung ein durchbohrter Hahn eingeschaltet, der durch den Schlag eines Pendels geöffnet und darauf wieder geschlossen wurde. Die Dauer der Öffnung ließ sich, je nach der Fallhöhe des Pendels, bis auf 0,004 Sekunden verkürzen; es bleibt aber zu bedenken, ob nicht bei so kleinen Zeiten Störungen durch Reflexion der Tonwellen in der Leitung mit ins Spiel kommen[2]).

Bei der Verwendung eines Hahnes geschieht überdies die Schließung und Öffnung genau genommen allmählich. Der Ton schwillt erst an, ehe er seine volle Stärke erreicht, und diese sinkt andererseits auch nicht plötzlich auf Null herab. Zwecks Gewinnung meßbarer Zeitminima bei möglichst exakter momentaner Öffnung und Schließung der Leitung haben Krueger und Wirth ein besonderes Tachistophon konstruiert, welches Bode in seiner Untersuchung über „Die Zeitschwellen für Stimmgabeltöne mittlerer und leiser Intensität" beschrieben und abgebildet hat[3]). Das Prinzip des Apparates ist das, daß zwei mit horizontalen Schlitzen versehene Platten in vertikaler Richtung aneinander verschoben werden und dem Tone, sobald und solange die Schlitze sich gegenüberstehen, der Durchtritt gestattet ist. Bode schaltete zwei Tachistophone hintereinander in die Leitung. Das erste war vor dem Versuch geschlossen, das zweite geöffnet. Während des Versuches wurde durch elektrische Auslösung zunächst das erste, d. h. also

1) Wundts Philos. Stud., Bd. 14, S. 471ff., 1898.

2) Vgl. C. Stumpf, Über das Erkennen von Intervallen und Akkorden bei sehr kurzer Dauer; Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. der Sinnesorg., Bd. 27, S. 148ff., 1902.

3) Wundts Psycholog. Stud., Bd. 2, S. 307, 1907.

die Leitung von der Tonquelle zum Ohre überhaupt, geöffnet und kurz darauf durch Schließung des anderen der Ton wieder abgesperrt. Das In-Gang-Setzen der Tachistophone besorgte ein Pendel, welches die Hebelkontakte der beiden Tachistophon-Stromleitungen nacheinander öffnete, und dessen Schwingungsdauer damit zugleich die Hörzeit bestimmte. Leider sind auch bei dieser Einrichtung ebenso wie beim Hahnverschluß gewisse Knallgeräusche nicht völlig zu beseitigen. Sie werden aber wenigstens wesentlich gemildert, wenn man beim Niederfallen des Tachistophons einen nach außen führenden kleinen Kanal sich öffnen läßt, durch den ein Ausgleich der entstehenden Lufterschütterung möglich ist.

Cross und Maltby[1]) bedienten sich einer telephonischen Tonübertragung und bewirkten durch ein Unterbrecherrad, daß der Strom immer nur für ganz kurze Zeit, die aus der Rotationsperiode des Rades zu berechnen war, zum Hörtelephon gelangte. Störende Nebengeräusche wurden beseitigt und Nachschwingungen waren, wie sich mittels eines die Lissajousschen Figuren zu Hilfe nehmenden Verfahrens erweisen ließ, nicht vorhanden.

Um Telephontöne handelte es sich auch bei der Untersuchung von De Groot[2]); die Ein- und Ausschaltung des Hörtelephons geschah aber hier durch ein Pendel, welches beim Hinwegschwingen über einen Quecksilberkontakt die Kette des Telephonstromes schloß, und zwar je nach der Fallhöhe während längerer oder kürzerer Zeit. Als Klangquelle dienten Zungenpfeifen, Lippenpfeifen und die Galtonpfeife. Der jeweils zu prüfende Ton wurde von einem Edelmannschen Mikrophon aufgenommen, das mit einem Trockenelement und einer Induktionsspule den primären Stromkreis bildete. Die Sekundärspule, deren Leitung in ein entferntes, akustisch isoliertes Zimmer führte, war mit einem Rheostaten verbunden und an diesen ein Nebenkreis angeschlossen, bestehend aus dem Pendel, dem Telephon und einem Saitengalvanometer (zur objektiven Stromstärkemessung). Die Bestimmung der Dauer des Telephonstromschlusses wurde hauptsächlich nach der (a. a. O. genauer beschriebenen) Pouilletschen Methode ausgeführt und aus der Hörzeit sowie der bekannten Schwingungszahl der Tonquelle die Anzahl der ins Ohr gelangten Schwingungen von Fall zu Fall berechnet. Durch Widerstandsänderungen im Rheostaten konnte die Stärke des Telephontones vom Minimum perceptibile an bis zu einem gewissen Grade beliebig gesteigert werden. Jeder Ton wurde bei drei verschiedenen Intensitäten, einer minimalen, einer mittleren und einer großen, beobachtet. Die so gewonnenen Dauerschwellen sind durchweg merkwürdig hoch. Wieweit das mit den speziellen Eigentümlichkeiten der Versuchsanordnung zusammenhängt, ist natürlich schwer zu entscheiden. De Groot selbst macht in dieser Beziehung auf den Reichtum der Klangquellen an Obertönen, auf

1) Proceedings of the Amer. Acad. of arts and sciences, Boston, vol. 19, p. 222, 1891.

2) Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg., II. Abteilung (Zeitschr. f. Sinnesphysiol.), Bd. 44, S. 18ff., 1910. — Eine bereits 1908 als Utrechter Dissertation veröffentlichte ganz ähnliche Untersuchung von J. F. A. van Mens war mir leider nur im Referat (D. Fortschritte d. Physik im Jahre 1908; 64. Jahrg., 1. Abteilg., S. 226) zugänglich. — G. Leimbach (Ann. d. Phys. (4), Bd. 39, S. 251ff., 1912) benutzte als Tonquelle ein Telephon, das von einer Wechselstromsirene erregt wurde, und als Unterbrecher ein Kontaktpendel.

einen jedesmal beim Anfang und Ende des Hörens auftretenden Knall und auf die komplizierte Schwingungsform der Telephon- bzw. Mikrophonplatten aufmerksam.

Alle hier angeführten Methoden zur Ermittelung der Dauerschwelle lassen sich auch mehr oder weniger unmittelbar für die Untersuchung des Anklingens der Tonempfindung verwenden. Besondere Beachtung erheischt freilich dabei der Umstand, daß die physikalische Tonintensität momentan in voller Höhe einsetzen muß und nicht etwa selbst erst ansteigen darf.

Bei dem Apparat von Kohlrausch sind die Zähne, wie erwähnt wurde, zum An- und Abschrauben eingerichtet, so daß man den Einfluß der zunehmenden Zahnzahl auf die subjektive Stärke und Deutlichkeit des Tones verfolgen kann. Noch bequemer wäre es vielleicht, wenn das Stück Zahnkranz durch eine anzublasende Löcherreihe mit leicht zu- und aufzumachenden Öffnungen ersetzt würde.

Exner[1]) verfuhr bei der Feststellung der Anzahl von Schwingungen, deren sein Ohr zur Erreichung der vollen Empfindungsintensität des Tones mindestens bedurfte, einfach so, daß er den zuleitenden Gummischlauch von einem Gehilfen mittelst eines Hebels zunächst zudrücken und dann während einer kürzeren oder längeren, natürlich genau registrierten, Beobachtungszeit öffnen ließ. Der Grenzwert zwischen den eben noch etwas zu kurz und den eben schon etwas zu lang erscheinenden Zeiten ergab näherungsweise die gesuchte Schwelle.

G. Kafka, dem es bei seiner Untersuchung „Über das Ansteigen der Tonerregung“[2]) darauf ankam, Töne von großer, aber variabler Kürze mit solchen von längerer, konstanter Dauer, aber veränderlicher physikalischer Intensität in bezug auf ihre Empfindungsstärke zu vergleichen, um so die Art des Anwachsens der letzteren mit der Hörzeit zu studieren, bemerkt über die Exnersche Schlauchabklemmung, daß bei rascher Öffnung das Nebengeräusch zu störend und bei langsamer die Zeitbestimmung nicht genau genug wäre. Er selbst benutzte deshalb bei einem Teile seiner Versuche Hähne mit schlitzförmigen Bohrungen, die durch eine elektromotorisch ausgelöste Pendel- bezw. Schleudervorrichtung geöffnet und geschlossen wurden. In einer weiteren Reihe von Beobachtungen geschah die Absperrung des Tones vom Ohre des Experimentierenden in der Weise, daß die Leitungsröhre durchschnitten war und zwischen die einander dicht und genau konzentrisch gegenüberstehenden, zu einer feinen Spitze ausgezogenen Öffnungen eine Platte (Lamelle) geschoben wurde, mit deren Beseitigung dann die Tonzuführung einsetzte. Genauer gesagt bestand diese Einrichtung in jenem Abschnitte der Leitung, welcher den kurzen Ton übermittelte, aus einem Pendel, das nach dem Prinzip des Tachistoskops einen mit variablem Schlitze versehenen Kreisring zwischen den Spitzen hindurchführte („Lamellenpendel“). In der für den Ton von konstanter Dauer bestimmten Röhrenabzweigung waren die Spitzen zunächst durch eine am Ende eines

1) A. a. O.

2) Wundts Psychol. Stud., Bd. 2, S. 256ff., 1907. Auch Leipziger philos. Inaug.-Dissert. 1906.

Hebels befestigte Platte getrennt; durch elektromotorisches Abziehen des Hebels wurde die Leitung für den Tondurchtritt frei gemacht, um nach der Beobachtung ebenfalls elektromotorisch durch eine zweite gleichartige Platte wiederum gesperrt zu werden („Lamellenhebel").

Die Hahnvorrichtung ließ im geöffneten Zustande den Ton ungeschwächt durch; geschlossen dichtete sie die Leitung völlig ab; leider war aber ein gewisses Geräusch bei der Hahnbewegung nicht zu vermeiden. Die andere Versuchsanordnung, die Kafka als Spitzenleitung bezeichnet, funktioniert geräuschlos; doch verhindert die Lamelle das Hindurchdringen des Tones nur dann gänzlich, wenn die Spitzenöffnungen von fast punktförmiger Feinheit sind, was wieder die Schallintensität sehr herabsetzt.

Bemerkenswert ist die Methodik Kafkas, die jeweilige Dauer der Leitungsöffnung, d. h. also die Hörzeiten, mittelst des Krueger-Wirthschen Kehltonschreibers [1]) zu messen. Er brachte zunächst die Borste desselben in exakte Resonanz mit einer Stimmgabel von genau bekannter Tonhöhe und ließ sie ihre Schwingungen auf ein Kymographion zeichnen. Sodann verband er den Luftraum des Kehltonschreibers durch einen mit seitlicher Öffnung versehenen Schlauch mit der einen Röhre der Spitzenleitung, während er in einen Schlauch, der mit der anderen Röhre verbunden war, hineinblies. Auf diese Weise wurde während der Öffnung der Leitung die Membran des Kehltonschreibers und somit die ihr aufliegende Borste gehoben, und die Zahl der dadurch von den übrigen auf dem Kymographion sich deutlich absetzenden Schwingungen zeigte die Dauer der Öffnung an. Die Konstanz der letzteren während mehrerer Versuche gewährleistete, wo sie verlangt wurde, beim Lamellenhebel das Kontaktpendel, welches die Elektromagnete in Tätigkeit setzte; ebenso beim Schleuderhahn. Das Lamellenpendel und der Pendelhahn ergeben von selbst bei konstanter Fallhöhe ceteris paribus auch eine konstante Öffnungszeit.

Die Abstufung der Intensität des Vergleichstones erreichte Kafka in sehr befriedigender Weise dadurch, daß in die Leitungsröhre Zwischenstücke eingesetzt werden konnten, die mit einer verschiedenen Zahl von Öffnungen in ihrer Wandung versehen waren, so daß bald mehr bald weniger Schall nach außen entwich und daher für das Ohr der Versuchsperson verloren ging.

Sich stützend auf die Arbeiten von Hartmann-Kempf, Max Wien u. a., denen zufolge einerseits eine Telephonmembran so gut wie momentan ihre Schwingungen mit dem Stromschluß beginnt und mit der Öffnung beendet, andererseits die Membranamplitude eine einfache Funktion der Stromstärke ist, hat P. Sander [2]) die Kafkaschen Versuche mit Telephontönen wiederholt. Eine elektrische Gabel — es kamen nacheinander die Töne C, g und e^1 zur Prüfung — wurde unter Zwischenschaltung eines passenden Lampenwiderstandes mit dem Straßenstrom verbunden und das Telephon in einen Nebenschluß zu diesem Stromkreise gelegt. Der Nebenschluß bestand aus zwei Zweigen. Durch den einen erhielt das Telephon die Impulse zu dem sehr kurzen Tone von variabler Dauer, durch den anderen wurde

1) Vgl. Bd. III, Abteilg. 6 dieses Handbuches, „Die Phonetik", S. 88ff.
2) Wundts Psycholog. Stud., Bd. 6, S. 1, 1910.

der längere Vergleichston von konstanter Dauer aber veränderlicher Intensität vermittelt. Der kurze Ton und die Bestimmung seiner Hörzeit wurde dadurch gegeben, daß ein Pendel durch Umlegen von Kontakten, welche, auf Schienen laufend, einander beliebig genähert werden konnten, den betreffenden Telephonstromkreis öffnete und schloß. Wurde das Telephon mittelst einer Wippe mit dem anderen Leitungszweige verbunden, so hörte man den Ton der Gabel — der also nunmehr als Vergleichston diente — so lange, als ein zweites Pendel diesen Stromkreis offen hielt. Letzteres Pendel ähnelte in seiner Form dem Kafkaschen Lamellenpendel. Während der halben Dauer seiner Schwingung schnitt es durch einen Quecksilberkontakt, wobei der Strom vom Telephon abgesperrt wurde, indem er von der Gabel durch das Pendel zum Quecksilber und von dort zur Gabel zurückfloß; während der anderen Hälfte der Schwingungszeit ging das Pendel ohne Berührung über den Kontakt hinweg und zirkulierte der Strom zwischen Gabel und Telephon. Die Abstufung der Intensität des Vergleichstones wurde durch Widerstandsänderungen bewirkt. Ein Nachteil der Versuchsanordnung war der, daß die Intensität der elektrischen Gabel nicht an allen einzelnen Versuchstagen auf genau denselben Wert gebracht werden konnte, sondern von einer Neu-Einstellung zur anderen wechselte. Auch machte sich bei Hörzeiten unter 30 bis 50 σ ein gewisses Nebengeräusch im Telephon sehr störend bemerkbar.

6. Abklingen der Tonempfindung. Tonunterbrechungen.

Versuche über das Abklingen der Tonempfindung pflegt man in der Weise anzustellen, daß man den betreffenden Ton nicht kontinuierlich, sondern durch Pausen in mehr oder weniger zahlreiche Tonstrecken zerlegt auf das Ohr wirken läßt und die Intermissionen so weit verkürzt, bis sie eben nicht mehr als solche kenntlich sind, die Wahrnehmung vielmehr den Charakter völliger Glätte hat. Eine einfache Überlegung lehrt indessen, daß man durch diese Methodik kein klares Bild von der subjektiven Nachwirkung des Tonreizes gewinnen kann. Bei jedem einzelnen Tonstoß wiederholt sich der Prozeß des Anklingens, des Verweilens der Erregung auf einer gewissen Höhe der Intensität und des hierauf folgenden Abklingens. Stellen wir uns diesen Vorgang graphisch vor, wobei die Zeiten die Abszisse bilden und die Intensitäten durch die Ordinaten repräsentiert werden, so erhalten wir eine Kurve, die zunächst ansteigt, dann eine Weile der Abszisse parallel läuft und zuletzt wieder zu ihr heruntersinkt. Nur wenn man in jedem Falle Form und Länge dieses absteigenden Schenkels genau kennt, hat man eine richtige Vorstellung von der Art des Abklingens. Wo aber eine Reihe von Tonstößen einigermaßen rasch aufeinander folgt, fallen offenbar immer die anklingenden Ordinaten des folgenden mit abklingenden des vorhergehenden zusammen, und beide Gruppen werden sich bei einer bestimmten Sukzessionsgeschwindigkeit der Tonstöße derart summieren, daß die Gesamtkurve fortwährend der Abszisse parallel ist oder doch wenigstens keine wahrnehmbaren Senkungen aufzuweisen hat. Durch die in Rede stehende Versuchsanordnung kann man also wohl die Sukzessionsgeschwindigkeit feststellen, bei der dieses Summationsverhalten der Kurvenkomponenten eben

merklich eintritt, aber gerade über die Gestalt der letzteren, auf die es eigentlich ankommt, erfährt man auf solche Weise nichts Genaues. Überdies gelangt bei schneller Folge der Tonstöße die Empfindung eines jeden von ihnen überhaupt nicht zur vollen Höhe des Anstiegs, weil es an Zeit dazu fehlt, während doch in erster Linie die Frage zu beantworten wäre, wie eine Tonempfindung abklingt, welche eine Zeitlang in ihrer ganzen, der Reizgröße entsprechenden Intensität perzipiert worden ist. Und schließlich ist auch hier wieder in Betracht zu ziehen, was bereits im vorigen Kapitel bei der Erörterung der Pfaundlerschen Versuche scharf betont werden mußte, daß nämlich bei häufiger Wiederkehr eines gleichartig-periodischen Wechsels von Tonstößen und Pausen eine komplizierte Klangerscheinung entsteht, indem sich Variationstöne, Kombinationstöne und Unterbrechungstöne in je nach den Versuchsbedingungen wechselnder Zahl und Stärke bilden. Die Fouriersche Analyse ergibt dabei, daß alle Teiltöne eine konstante Amplitude haben, Pausen also physikalisch überhaupt nicht vorhanden sind. Was man an Tonstößen, Intermissionen, Rollen oder Rauhigkeit hört, rührt von den Schwebungen der Partialtöne her, und wenn man, wie z. B. Alfred M. Mayer[1]), die Grenze feststellt, wo die Rauhigkeit wieder in Glätte übergeht, so macht man lediglich Versuche über die Grenze der Hörbarkeit frequenter Schwebungen.

Demnach ist das Prinzip des Verfahrens von Urbantschitsch[2]), eine einzelne Lücke zwischen zwei gleichartigen Tonempfindungen durch die subjektive Nachdauer der ersten zu überbrücken, wesentlich zweckentsprechender als das Mayersche, obwohl auch hier wegen der Einmischung des Anklingens der zweiten Empfindung die Resultate nicht ganz rein sein können. Sein Instrumentarium beschreibt Urbantschitsch, wie folgt. Ein mit Blei gefüllter Holzwürfel wird als Pendel benutzt. Derselbe ist von einem rechtwinkelig verlaufenden Kanal durchsetzt, dessen eine Mündung in der oberen Wand liegt, während die andere sich in der Mitte der einen, zur Schwingungsebene des Pendels parallelen Seitenfläche befindet. Von der oberen Öffnung führt ein Gummischlauch zur Tonquelle; die seitliche steht in luftdichter Verbindung mit einer spitz zulaufenden Glasröhre. Dieser stehen zwei andere, ebenfalls spitz endigende Glasröhren gegenüber, welche in einem bestimmten Abstande voneinander in einem Stativ eingeklemmt sind. Von jeder dieser Röhren geht ein Hörschlauch aus. Soll nur ein Ohr zur Beobachtung verwendet werden, so werden beide Hörschläuche mit den zwei Enden einer T-Röhre verbunden, deren dritter Ast mit dem Ohre kommuniziert. Bei diotischer Prüfung fällt das T-Stück fort, und die beiden Hörschläuche werden direkt, der eine in den rechten, der andere in den linken Gehörgang geleitet. Die Spitze der Röhre am Würfel wird durch die Pendelbewegung an den anderen beiden ruhenden Röhrenspitzen vorbeigeführt, wobei zwei aufeinander folgende Erregungen des Trommelfelles stattfinden, deren zeitliche Distanz aus der Geschwindigkeit des Pendels und dem Abstande der den Ton aufnehmenden stabilen Röhrenmündungen

1) Vgl. meinen Artikel „Gehörssinn“ in Nagels Handbuch d. Physiologie, Bd. III, S. 505 f., Braunschweig 1905.

2) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. 25, S. 323 ff., 1881.

leicht zu berechnen ist. Bei schnellen Pendelschwingungen, also rascher Sukzession der beiden akustischen Impulse, ist nur ein einziger Gehörseindruck bemerkbar; mit abnehmender Pendelgeschwindigkeit tritt zunächst eine Spaltung des Tones ein und darauf eine deutliche Trennung in zwei Töne.

Nachteile dieser Versuchsanordnung sind die Schwäche und die Kürze der Töne. Bei einer Wiederholung derartiger Beobachtungen würde man darauf ausgehen müssen, einen länger anhaltenden Ton von gleichmäßiger und nicht zu geringer Intensität durch eine, als solche eben nicht mehr wahrnehmbare Pause zu unterbrechen. Vielleicht ließen sich hierzu mit entsprechender Modifikation die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Tachistophone oder Hahnvorrichtungen verwenden. Auch an eine kurzdauernde, etwa durch ein Kontaktpendel bewirkte Intermission eines Telephontones wäre zu denken.

Frequente Unterbrechungen eines Tones zum Zwecke des Studiums der Variations- und Unterbrechungstöne lassen sich in mannigfacher Weise herstellen. Es soll jedoch hierauf nur kurz eingegangen werden, da diese Dinge nach den aufklärenden Untersuchungen der neueren Zeit[1]) weit mehr das Interesse der Physiker als jenes der Physiologen verdienen.

Wenn man bei einem Zahnrade in regelmäßigen Abständen einzelne Lücken durch Ausfüllen beseitigt oder eine Anzahl Zähne fortnimmt, so treten bei der Rotation an den betreffenden Stellen Pausen in den Vibrationen des auf dem Rande schleifenden Kartenblattes ein. Für manche Versuche ist es nützlich, diese Veränderungen auf die halbe Breite des Zahnkranzes zu beschränken und auf der anderen Hälfte die gleichförmige Aufeinanderfolge von Zahn und Lücke bestehen zu lassen. Je nachdem man dann während der Umdrehungen das Kartenblatt gegen die eine oder andere Kante der Peripherie schlagen läßt, hört man den Primärton allein oder Primärton und Unterbrechungston zusammen, und der Wechsel zwischen beiden erleichtert die Beobachtung. Übrigens läßt sich eine Radsirene auch in derselben Weise benutzen wie eine Löcherscheibe. Bläst man nämlich einen senkrecht zur Fläche des Rades gerichteten Luftstrom aus einer feinen Öffnung gegen den Zahnkranz, so werden Primärton und Unterbrechungston ebenfalls, wenn auch nur leise, gehört.

Wie aber überhaupt, so arbeitet es sich auch hier bequemer mit Sirenen vom Prinzip der Seebeckschen. Man kann deren Öffnungen entweder von vornherein in der Art, wie man die Folge von Luftstößen und Pausen zu haben wünscht, aus der Scheibe ausstanzen lassen, wobei diese am besten gleich mit mehreren konzentrischen Löcherkreisen versehen wird, oder man verwendet eine Sirene, bei der die Konfiguration des Löcherkreises je nach Bedarf variabel ist. Als solche leistete bei den Untersuchungen von Abraham und mir eine Holzscheibe gute Dienste, die einen Durchmesser von 30 cm bei einer Dicke von 4 mm hatte. Ihre Löcher, welche 5 mm groß und ebensoweit voneinander entfernt waren, konnten durch kleine, gut

1) S. meinen Artikel „Gehörssinn“ in Nagels Handbuch d. Physiologie, Bd. III, S. 532 ff., Braunschweig 1905, u. F. A. Schulze, Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 26, S. 217 ff., 1908.

passende und bequem zu handhabende Korkstöpselchen abgedichtet werden. Natürlich steht auch dem nichts im Wege, die Öffnungen, die man gerade verschließen möchte, mit Papierstreifen zu bekleben; dieser Modus empfiehlt sich besonders bei den Metallscheiben. — Daß auch angeblasene Löcherkreise, deren Öffnungen äquidistant sind, aber an Größe periodisch zu- und wieder abnehmen, Unterbrechungstöne hören lassen, hat Rudolph Koenig gezeigt[1]).

Helmholtz[2]) brachte intermittierende Töne mit seiner Doppelsirene hervor, indem er statt des Windrohres des oberen Kastens eine kleine Zungenpfeife einsetzte und durch diese die Luft eintrieb. Ihr Ton wird nach außen hin nur hörbar, so oft bei der Umdrehung der Scheibe deren Löcher vor die Löcher des Kastens treten und der Luft den Ausweg eröffnen. Die Doppelsirene läßt sich aber auch noch auf andere Weise für den gleichen Zweck benutzen. „Zu dem Ende", sagt Helmholtz hierüber, „entferne ich den unteren Windkasten und lasse nur seinen durchlöcherten Deckel stehen, über dem die rotierende Scheibe läuft. Von unten her wird das Ende eines Kautschukrohres an eine der Öffnungen des Deckels angesetzt, dessen anderes Ende mittelst eines passenden Röhrchens in das Ohr des Beobachters geleitet ist. Durch die umlaufende Scheibe wird die Öffnung, an welche das Kautschukrohr angesetzt ist, abwechselnd geöffnet und geschlossen. Bringt man in ihre Nähe oberhalb der rotierenden Scheibe eine Stimmgabel oder ein anderes passendes Tonwerkzeug, so hört man den Ton intermittierend, und dadurch, daß man die Scheibe der Sirene schneller oder langsamer umlaufen läßt, kann man die Zahl der Intermissionen beliebig regulieren."

Eine einfachere Form dieses Versuches besteht darin, daß man zwischen der Gabel und einem auf sie abgestimmten Resonator, welcher seinerseits mit einem Hörschlauch verbunden ist, irgendeine Scheibe mit regelmäßigem Löcherkreis von nicht zu kleinen Öffnungen sich drehen und damit die periodische Durchlassung bzw. Absperrung des Tones besorgen läßt. Bei Anwendung höherer Gabeln genügt es sogar, dieselben mit den Zinkenenden nahe an einen rotierenden Löcherkreis zu halten, um die dabei auftretenden sekundären Klangerscheinungen für das bloße Ohr in freier Luft ganz deutlich vernehmbar zu machen. — Beachtenswert ist bei allen solchen Versuchen, daß eine Seebecksche Scheibe schon allein durch ihre Drehung eine Art von Eigenton, wenn man so sagen darf, erzeugt, welcher höchstwahrscheinlich durch die Reibung der Luft an den Rändern der Löcher entsteht. Abraham und ich[3]) haben diesen „Scheibenton", wie wir ihn benannten, genauer untersucht und namentlich seine physikalische Natur festgestellt.

Dreht man eine vertikal vor das Ohr gehaltene Stimmgabel um ihre Längsachse, so hört man den Ton bei jeder Umdrehung viermal anschwellen und viermal verlöschen. Diese mit der Selbstinterferenz der Gabeln[4]) zu-

1) Quelques expériences d'acoustique; p. 140, Paris 1882.
2) Lehre v. d. Tonempfindungen; 5. Ausgabe, S. 280f.
3) Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol., Bd. 88, S. 475ff., 1901.
4) Vgl. oben S. 245.

sammenhängende Erscheinung läßt sich ebenfalls zu Versuchen über die aus Tonunterbrechungen resultierenden sekundären Klangphänomene benutzen. Man spannt zu dem Zwecke die Gabel in eine Zentrifugalmaschine oder eine Drehbank, streicht sie an und versetzt sie, am besten vor einem gleichgestimmten Resonator, in rasche Rotation[1]).

Eine gründliche Untersuchung des Wesens der Variations- und sogen. Unterbrechungstöne hat zur Voraussetzung, daß die Frequenz der Intermissionen innerhalb möglichst weiter Grenzen variabel ist. Abraham und ich[2]) haben das auf elektro-akustischem Wege durch Ausgestaltung der von Zwaardemaker in seiner Arbeit „Über Intermittenztöne“[3]) angegebenen Versuchsanordnung erreicht. Dieser Autor ließ den Ton einer Stimmgabel oder einer Zunge von einem Mikrophon aufnehmen, in dessen Leitung sich außer einem oder zwei Leclanché-Elementen die primäre Spirale einer kleinen Induktionsspule befand, während die sekundäre nach einem Telephon abgeleitet war. In die Telephonkette konnte mit Hilfe einer Wippe ein übrigens vollständig isolierter, von einer elektrisch getriebenen Stimmgabel 64 mal in der Sekunde geöffneter und geschlossener Kontakt aufgenommen werden. Daß die Frequenz der Unterbrechungen auf diese eine Zahl beschränkt und letztere außerdem so niedrig gewählt wurde, hat sich in der Folge als ein erheblicher Nachteil erwiesen.

Abraham und ich benutzten bei einem Teile unserer Versuche für die Öffnungen und Schließungen der Telephonkette zwei Exemplare des Bernsteinschen akustischen Stromunterbrechers[4]). Der eine Unterbrecher und die Magnetspule des zweiten wurden mit einem Akkumulator zu einer Stromkette vereinigt und die beiden Federn auf genau gleiche Tonhöhe abgestimmt. Wurde der Strom geschlossen, so geriet die Feder des zweiten Unterbrechers in Mitschwingungen und besorgte damit, sobald sie nebst ihrem Quecksilbernapf in die Kette des Telephons aufgenommen war, die Unterbrechungen des Telephonstromes. Die Einzelheiten dieser Kombination werden sofort übersichtlich, wenn man in Figur 92 einerseits die Verbindungen der Unterbrecher U_I und U_{II} untereinander sowie mit dem Akkumulator A, andererseits den Verlauf der Leitungsdrähte in der sekundären Kette, der Telephonkette, von Klemme zu Klemme verfolgt. Die Zeichnung veranschaulicht im übrigen die (freilich nicht immer unbedingt nötige) Verteilung des Instrumentariums in drei getrennte Zimmer und den (zeitweiligen) Ersatz des Mikrophons durch eine dritte als Quelle des Primärtones dienende Bernsteinsche Feder (U_{III}).

Für Unterbrechungen von mehr als 400 pro Sekunde bedienten wir uns eines durch einen Elektromotor in Rotation versetzten Rades aus Messing

1) Betreffs der analogen Verwendung von Klangplatten oder Glocken und der näheren Literaturangaben hierüber s. Karl L. Schaefer u. Otto Abraham, Studien über Unterbrechungstöne, III. Mitteilung; Pflügers Arch. f. d. ges. Physiologie, Bd. 88, S. 478ff., 1901, sowie die auch sonst für die Technik der Tonunterbrechungen und namentlich der Phasenverschiebung interessante Untersuchung von Exner u. Pollak, Zeitschr. f. Psychol. etc., Bd. 32, S. 305ff., 1903.

2) Karl L. Schaefer u. Otto Abraham, Zur Lehre von den sogenannten Unterbrechungstönen; Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 13, S. 996ff., 1904.

3) Arch. f. Anat. u. Physiol., Physiol. Abteilg., Supplementbd. S. 60ff., 1900.

4) S. oben S. 272.

von etwa 20 cm Durchmesser. Dasselbe wurde so in die Kette des Telephons eingeschaltet, daß der eine Pol mit der Achse des Rades verbunden wurde, der andere mit einer Bürste, die auf dem Radkranze schleifte. In letzteren waren in gleichen Abständen gleich große Lücken eingeschnitten, die mit Hartgummiplatten ausgefüllt waren. Solange die Bürste über eine solche Platte hinwegging, war die Kette geöffnet. In den Radkranz waren ferner nach der Art der Seebeckschen Sirene Löcher geschlagen, deren Kreis während der Rotation angeblasen werden konnte. Aus der Höhe des dabei entstehenden Tones ließ sich die Umdrehungsgeschwindigkeit und damit die jeweilige Anzahl der Unterbrechungen pro Sekunde berechnen. Zu einer Serie von Beobachtungen verwendeten wir außer dem Rade eine nach demselben Prinzip funktionierende Walze, die gleichsam aus mehreren konaxial aneinander gesetzten Rädern von der eben beschriebenen Form, aber mit ungleich vielen Unterbrechungsstellen bestand und daher eine Ver-

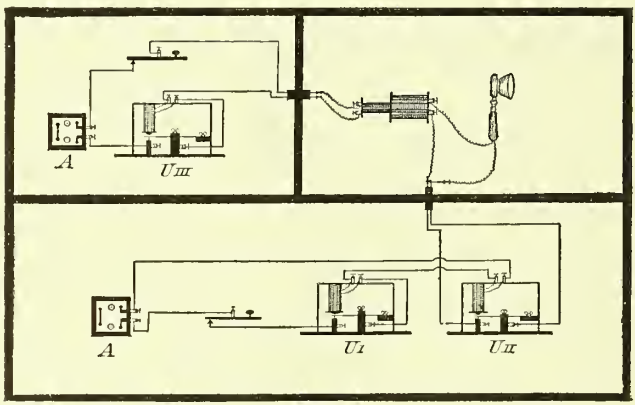


Fig. 92.

änderung der Unterbrechungszahl durch seitliches Verschieben der Bürste ohne einen Wechsel der Umdrehungsgeschwindigkeit gestattete. Die letztere wurde hierbei aus der Höhe des Tones ermittelt, den ein auf der Achse befestigtes Zahnrad hören ließ, wenn während des Umlaufs ein Kartenblatt daran gehalten wurde. Mittelst des Unterbrechungsrades bezw. der Walze konnten bis zu 1800 Unterbrechungen in der Sekunde erzielt werden.

7. Schwebungen und Zwischentöne.

Die mannigfachen Verschiedenheiten im Charakter der Schwebungen sind im wesentlichen bedingt erstens durch die Schwingungszahlen-Distanz und zweitens durch die Höhenlage der interferierenden Töne.

Allzu langsame und allzu schnelle Schwebungen vermag das Ohr nicht mehr wahrzunehmen. Es ist daher eine Aufgabe der physiologischen Akustik, die untere und obere Frequenzgrenze festzustellen. Wie C. Stumpf in seiner Tonpsychologie[1]) bemerkt, hat A. Mayer eine Schwebung von

1) Bd. II, S. 464; Leipzig 1890.

8 Sekunden, Rayleigh sogar solche von 24 Sekunden Dauer noch gehört und letzterer überdies die Meinung geäußert, daß man wohl noch längere würde beobachten können. In der Tat ist dies F. Lindig[1]) gelungen. Er näherte zwei fast unisone Gabeln, deren eine an Kautschukfäden hing, während die andere frei in der Hand gehalten wurde, einander bis auf einen Abstand von 5 mm in der Weise, daß die vier Zinken in einer Linie nebeneinander lagen, und brachte zwischen den Gabeln ein spitz auslaufendes Glasröhrchen an, welches durch einen Hörschlauch mit dem Ohre verbunden war. Man vernimmt dann das abwechselnde Anwachsen und Verschwinden des Grundtones selbst noch bei einer Schwebungsdauer von 80—90 Sekunden. Lindig sagt a. a. O.: „Ich habe diese Grenze sogar noch auf das Doppelte erweitert, indem ich die in der Hand gehaltene Gabel um 90° drehte, nachdem ein Erlöschen des Grundtones beobachtet worden war. Dadurch tritt dies nämlich schon nach der halben Schwebungszeit wieder ein. Also konnten so allein durch das Ohr Schwebungen von der Dauer von je 160 bis 180 Sek. beobachtet werden."

Die obere Frequenzgrenze für die Wahrnehmbarkeit der Schwebungen ist in den einzelnen Oktaven verschieden. Je höher die Primärtöne liegen, um so schnellere Intermissionen vermag das Ohr noch zu perzipieren. Zu Untersuchungen hierüber bedient man sich am bequemsten der Stimmgabeln, etwa Koenigscher Gabeln auf Resonanzkasten oder der Edelmannschen Laufgewichtgabeln, die dann unmittelbar vor das eine Ohr gebracht werden. Dabei hat man allerdings darauf zu achten, daß beide Töne mit gleicher Stärke zu Gehör kommen. So empfiehlt Stumpf gelegentlich in seiner Tonpsychologie, zur Erzeugung kräftiger Schwebungen die Gabeln rechtwinklig gegeneinander gerichtet vor die Ohröffnung zu halten. Die Stimmgabeln haben hierbei den Vorzug, daß ihre harmonischen Obertöne nicht allzu stark und zahlreich sind. Bei ganz exakten Versuchen wird man freilich die Obertonschwebungen, die namentlich in den unteren Oktaven einen störenden Einfluß geltend machen können, beseitigen müssen und zu diesem Zwecke wohl am besten Orgelpfeifen wählen, deren Töne in ein entferntes Zimmer und durch einen auf Auslöschung der schädlichen Obertöne eingestellten Interferenzapparat geleitet werden.

Zum Studium und zur Demonstration des klanglichen Charakters der Schwebungen in seiner Abhängigkeit von ihrer Frequenz eignen sich die Appunnschen Tonmesser mit den zahlreichen Zungen von langsam und stetig ansteigender Tonhöhe recht gut. Nach einiger Übung werden auch die meisten Beobachter bald imstande sein, die Grundtöne und deren Schwebungen aus dem Klangganzen isoliert herauszuhören; anderenfalls läßt sich das eine oder andere schwebende Teiltonpaar mit Hilfe des entsprechenden Resonators hervorheben. Will man aber die scharfe Klangfarbe der Zungen, die Überlagerung der Grundtonschwebungen durch die diversen Obertonschwebungen durchaus nicht mit in den Kauf nehmen, so wird der Sternsche Tonvariator den Vorzug verdienen. Auch an die Verwendbarkeit der Helmholtzschen Doppelsirene zur Erzeugung von Schwebungen, wovon schon auf Seite 280 die Rede war, sei hier erinnert.

1) Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 11, S. 43, 1903.

Wo es etwa darauf ankommt, die Schwebungsfrequenz ganz allmählich und gleichmäßig zu verändern, benutzt man zweckmäßig zwei mit Wasser gefüllte und mit einem Abflußhahn versehene Tonflaschen[1]), die anfänglich unison gestimmt sind und aus deren einer man dann das Wasser langsam ausfließen läßt. Wird nach einiger Zeit der Hahn geschlossen und jener der anderen Flasche geöffnet, so tritt umgekehrt eine sukzessive Verlangsamung der Stöße bis zum Unisono in die Erscheinung. Mit derartigen Flaschen, gleichwie mit dem Tonvariator, kann jede beliebige Tonhöhendistanz, also auch Schwebungsgeschwindigkeit eingestellt werden; doch ist die Unveränderlichkeit derselben wegen des bekannten Einflusses von Temperatur- und Anblasedruckschwankungen auf die Tonhöhe fraglich. Von diesem Übelstande frei sind die auf S. 346 erwähnten Gabeln, deren Höhe sich durch eine in das Zinkenende eingelassene Schraube regulieren läßt, und die daher beispielsweise für Versuche über den ebenmerklichen Unterschied in der Frequenz von Schwebungen das geeignetste Instrumentarium sein würden.

Erklingen zwei Töne von sehr wenig differenter Höhe zusammen, so nimmt man nur einen einzigen, langsam schwebenden Primärton wahr. Gibt man aber zwei etwas weiter auseinander liegende Töne gleichzeitig an, so wird außer den beiden Primärtönen noch ein dritter, zwischen ihnen liegender gehört und zugleich als Träger der Schwebungen aufgefaßt. Im Jahre 1875 haben Terquem und Boussinesq[2]) über diesen „Schwebungston", wie sie ihn nannten, mit zwei elektrisch betriebenen Gabeln von der Tonhöhe c^0 experimentiert, die durch Laufgewichte bis zum Betrage einer kleinen Terz gegeneinander verstimmbar waren. Die Gabeln standen, akustisch isoliert, vor Resonatoren, von denen aus Gummischläuche zum Platze des Beobachters führten. Durch Zudrücken der einen oder anderen Leitung konnte der Zusammenklang in beliebigem Wechsel mit den einzelnen Primärtönen zu Gehör gebracht und so die Höhe des Schwebungstones mit jener der Primärtöne verglichen werden. Die jetzt ziemlich allgemein gebräuchliche Bezeichnung „Zwischenton" ist von C. Stumpf eingeführt worden, der in seiner Tonpsychologie[3]) sorgfältige Beobachtungen über die Tonhöhe der Schwebungen kleiner Intervalle mitgeteilt hat, Beobachtungen, welche teils an der Geige, teils an dem „mathematischen Harmonium" des Herrn Prof. Gustav Engel angestellt wurden. Bald nach dem Erscheinen der Tonpsychologie von Stumpf hat Melde[4]) über Versuche mit Zwischentönen oder, wie er sagt, „resultierenden" Tönen berichtet. Als Tonquellen dienten ihm die Zungen Appunnscher Tonmesser. Zur Feststellung der Höhe des Zwischentones empfiehlt er, den Ton lieber nachsingen als etwa auf der Violine oder einem Monochorde nachspielen zu lassen. Jedoch wird man, wo es sich um eine möglichst genaue Ermittelung der Schwingungszahl des Zwischentones handelt, das wiederholte Vergleichen desselben mit einem kontinuierlich verstimmbaren und die jeweils eingestellte Tonhöhe exakt haltenden Instrumente, z. B. einer Laufgewichtgabel, kaum umgehen können.

1) Vgl. hinsichtlich der Konstruktion derselben das auf S. 254 Gesagte.
2) Journal de physique, t. 4, p. 193 etc.
3) Bd. II, S. 480ff., 1890.
4) Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. 60, S. 623ff., 1895.

Dem Probleme des Zwischentones verwandt ist die Frage nach dem Gehörseindruck, welcher durch den Zusammenklang einer größeren Zahl wenig verschieden hoher Töne hervorgerufen wird. Schon Melde hat dieses Thema in seiner eben erwähnten Untersuchung in Angriff genommen, und ganz vor kurzem ist dasselbe von Stefan Baley[1]) zum Gegenstande einer Spezialarbeit gemacht worden. Gleich Melde fand auch dieser Autor die Appunnschen Zungen vorwiegend geeignet zu den einschlägigen Beobachtungen. Es ist zwar zeitraubend, sie passend abzustimmen, dafür bleibt aber auch die Tonhöhe und ebenso die Stärke unverändert, während bei den Stimmgabeln das rasche Abklingen sowie die Ungleichmäßigkeit der Intensitäten störend wirkt und bei den angeblasenen Tonflaschen die Schwingungszahl nicht immer genügend konstant zu erhalten ist.

Besondere Verhältnisse ergeben sich hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit und des Klangcharakters der Schwebungen, wenn der eine Primärton dem rechten, der andere dem linken Ohre zugeführt wird. Man spricht in diesem Falle von diotischen Schwebungen, im Gegensatz zu der gewöhnlichen monotischen Beobachtungsweise, bei der ein Ohr oder jedes Ohr beide Primärtöne empfängt. Die diotischen Schwebungen entstehen zweifellos in erster Linie dadurch, daß die Primärtöne nicht nur das nächstgelegene Trommelfell auf dem Wege der Luftleitung erregen, sondern durch die Kopfknochen zugleich auf das andere Ohr übertragen werden. Sind die Primärtöne einigermaßen laut, so gelangen die Tonwellen freilich auch durch die Luft hindurch mit wirksamer Intensität zu beiden Gehörorganen. Man kann aber diese Art der Luftleitung „um den Kopf herum", wo es darauf ankommt, leicht ausschalten. Ein Mittel zu diesem Zwecke besteht darin, daß man die Tonquellen in getrennten Zimmern aufstellt und die Töne durch schalldichte Röhren oder Schläuche direkt in die Ohren des in einem dritten Raume befindlichen Beobachters leitet. Eine andere, noch einfachere Methode ist die folgende. Man nähert eine Stimmgabel dem einen Ohr so weit, daß ihr Abstand noch etwas geringer ist als die Distanz der Ohren, wartet, bis sie verklungen, und führt sie hierauf möglichst dicht an die Gehörgangsöffnung. Sie wird dann wieder hörbar, aber ihr Ton kann nun das andere Ohr nicht mehr auf dem Wege durch die Luft außen um den Kopf herum erreichen. Verfährt man in dieser Weise mit zwei gegeneinander verstimmten, auf beide Ohren verteilten Gabeln, so ist es sicher, daß die diotischen Schwebungen nur durch die Knochenleitung zustande kommen.

Am Schlusse dieses Kapitels ist noch mit einigen Worten der sogen. „schwebenden Hilfsgabel" zu gedenken, die in der physiologischen und psychologischen Akustik gerne als analytisches Mittel gebraucht wird, um über die an und für sich zweifelhafte Existenz oder Nicht-Existenz eines bestimmten Tones in einem Klange bezw. Geräusche ins Reine zu kommen; z. B. falls es sich darum handelt, festzustellen, ob es gelungen ist, die Oktave irgend eines Grundtones durch Interferenz auszulöschen. Bekanntlich fällt es, zumal Ungeübten, schon schwer, die Oktave neben dem Grundton mit bloßem Ohre noch zu hören, lange bevor ihre absolute Stärke auf ein Minimum reduziert ist, was zum Teil in der Verdeckung durch den lauteren

1) Zeitschrift f. Psychol., Bd. 67, S. 261; 1913.

Grundton, hauptsächlich aber nach Stumpf in der konsonanten Verschmelzung beider Töne seinen Grund hat; und erst wenn die Oktave mit einer um einige Schwingungen von ihr differierenden Gabel (oder anderen passenden Tonquelle) keinerlei Schwebungen mehr ergibt, ist sie zuverlässig als unterschwellig und somit praktisch als beseitigt zu betrachten[1]). Die Wirksamkeit der schwebenden Hilfsgabel — deren Intensität ungefähr gleich jener des zu ermittelnden Tones sein muß — beruht im Wesentlichen darauf, daß alle intermittierenden Sinneseindrücke, also auch Tonstöße, sich dem Bewußtsein viel leichter bemerklich machen als gleichmäßige. Hierzu kommt noch der Umstand, daß der fragliche Ton durch den hinzutretenden Hilfston eine eben als Schweben vernommene, periodisch abwechselnde Vergrößerung und Verringerung seiner Amplitude erfährt, und daß jedesmal mit ersterer eine Zunahme der Empfindungsstärke verbunden ist, durch die gelegentlich selbst an sich unhörbare Töne noch über die Schwelle gehoben werden können.

In vielen Fällen ist jedoch auch eine gewisse Vorsicht bei dem Gebrauche der schwebenden Hilfsgabel am Platze. So wollte R. Koenig[2]) den Differenzton 7×32 der Primärtöne c^1 (8×32) und h^1 (15×32) dadurch nachgewiesen haben, daß eine Hilfsgabel von 7×32−4 Doppelschwingungen gerade 4 Stöße im Zusammenklang mit den beiden anderen Gabeln hören ließ. Rechnungsmäßig können diese 4 Schwebungen freilich von dem Differenztone $h^1 - c^1 = 7\times32$ v. d. und der Hilfsgabel herrühren, in Wirklichkeit aber, mit Rücksicht auf die zweifellose Anwesenheit des Obertones c^2, ebensogut aus $[c^1 - (7\times32 - 4)] - [c^2 - h^1] = 4$ erklärt werden, und analog verhält es sich bei den von Koenig a. a. O. in gleicher Weise auf den Differenzton 5 geprüften Intervallen 4:9 sowie 3:8. Wenn aber auch hiernach durch die Stöße der Hilfsgabel die Existenz des gesuchten Tones nicht immer ohne Weiteres bewiesen wird, so entscheidet doch umgekehrt das Fehlen jeglicher Schwebungen jedenfalls sein Nichtvorhandensein für das Ohr.[3])

8. Kombinationstöne.

Es gibt zwei Gruppen von Kombinationstönen, welche man als physikalische (objektive) und physiologische (subjektive) unterscheiden kann.

Die ersteren sind solche, die mit den Primärtönen zugleich von der Klangquelle hervorgebracht werden, also in dem das Ohr treffenden Schallwellenzuge bereits als pendelförmige Komponenten enthalten sind. Sie lassen sich am Harmonium, an der Doveschen Sirene, den Appunnschen Zungenkasten, singenden Bogenlampen, empfindlichen Flammen und Wasserstrahlen sowie, was physiologisch besonders wichtig ist, auch an Membranen

1) Mittelst der schwebenden Hilfsgabel konnte C. Stumpf in seiner Untersuchung „Über die Ermittelung von Obertönen“ (Wiedemanns Annalen d. Physik u. Chemie, Bd. 57, S. 660—681, 1896) außer der Oktave noch eine ganze Anzahl von Teiltönen in Klängen finden, die bis dahin als ganz oder nahezu einfache gegolten hatten.

2) Poggendorffs Annalen d. Phys. u. Chem., Bd. 157, S. 216, 1876.

3) Von der speziellen Verwendung schwebender Hilfsgabeln zum Nachweise leisester Kombinationstöne wird noch im folgenden Kapitel die Rede sein.

beobachten, wobei ihre physikalisch-objektive Natur durch das Mittönen von gleichgestimmten Gabeln oder Resonatoren erwiesen wird.[1])

Bei der zweiten Gruppe handelt es sich um Kombinationstöne, die trotz ihrer zuweilen nicht unbeträchtlichen subjektiven Intensität keinerlei Resonanzerscheinungen seitens physikalischer Instrumente hervorrufen und mithin offenbar physiologischen Ursprungs sind. Als ihr Entstehungsort ist mit größter Wahrscheinlichkeit das Trommelfell bezw. bei dessen Defekt das ovale Fenster[2]) anzusehen. Unter dieser Voraussetzung verhalten sich die physiologischen Kombinationstöne gegenüber dem Cortischen Organ, an das sie als selbständige Töne neben den Primärtönen von außen herantreten, gerade so wie die physikalischen oder wie sonstige Teiltöne eines außerhalb des Ohres erzeugten Klanges überhaupt.

Im Rahmen dieser Abhandlung haben wir es nur mit den physiologischen Kombinationstönen zu tun, die gleich den physikalischen wieder in die beiden Unterabteilungen der Differenztöne und der Summationstöne zerfallen.

Ist h die Schwingungszahl des höheren und t die des tieferen Primärtones, so ist der sogenannte erste Differenzton oder Differenzton erster Ordnung von der Form $h - t$. Er ist am klarsten, wenn die Primärtöne eine hohe Lage und dabei nur ein kleines Intervall haben. Als Schallquellen für die Primärtöne eignen sich, namentlich zum Zwecke der Demonstration oder der Übung im Heraushören von Differenztönen aus Klängen, die Lippenpfeifen wegen der Stärke, Weichheit und beliebig langen Dauer ihrer Töne besonders gut. Bei ihrer Benutzung kann man den Differenzton in aller Ruhe beobachten, wobei gelegentlich einige Kopfbewegungen nützlich sind, da die Intensität der Kombinationstöne öfter mit der Stellung wechselt, welche der Hörende zu den Instrumenten einnimmt. Sorgfältig gearbeitete, laute und langsam ausschwingende Gabeln auf Resonanzkasten ergeben gleichfalls deutliche Differenztöne. Sie besitzen, wenn ihre Schwingungszahlen einmal präzise ermittelt sind, den Vorzug, daß dann auch die Höhe des Differenztones ohne Weiteres genau bekannt ist und im Verlaufe des Versuches konstant bleibt, was beides für die Pfeifen bei ihrer Abhängigkeit von Druck- und Temperaturschwankungen nicht immer mit genügender Exaktheit zutrifft. Von angeschlagenen oder gerissenen Saiten gelieferte Primärtöne haben den Nachteil, daß sie verhältnismäßig schwach sind und rasch abklingen, so daß Versuche über Kombinationstöne am Klavier einen schon einigermaßen geübten Beobachter erfordern, während die länger anhaltenden Geigenklänge in dieser Beziehung günstigere Bedingungen darbieten; hierbei dürfte übrigens auch der Umstand mitwirken, daß die Kombinationstöne (wenigstens bei obertonreichen Klängen) am kräftigsten sind,

1) Nähere Einzelheiten und Literaturangaben s. bei Auerbach, Akustik, Bd. II des Handbuches d. Physik von Winkelmann, 2. Aufl., S. 633 ff., Leipzig 1909. — Vgl. ferner Karl L. Schaefer, Über d. Erzeugung physikalischer Kombinationstöne mittels des Stentortelephons; Annalen d. Physik (4. Folge), Bd. 17, S. 572 ff., 1905 und die diversen Abhandlungen von E. Waetzmann in Band 20 ff. der Annalen der Physik.

2) Vgl. Karl L. Schaefer, Über die Wahrnehmbarkeit von Kombinationstönen bei partiellem oder totalem Defekt des Trommelfelles; Passows u. Schaefers Beiträge z. Anat. etc. d. Ohres etc., Bd. 6, S. 207 ff., 1913.

wenn die Primärtöne ein ganz reines Intervall bilden, und daß man eben auf der Geige rein spielen kann, nicht aber auf den temperiert gestimmten Tasteninstrumenten.[1]) Will man zur Erzeugung der Primärtöne Membranen, Zungenpfeifen oder Dovesche Sirenen verwenden, so muß man stets im Auge behalten, daß die aus einem gemeinsamen Luftraume angeblasenen Zungen und Löcherkreise ebenso wie eine Membran, welche die beiden Primärtöne hören läßt, außer den subjektiven auch objektive Kombinationstöne ergeben, wie schon oben erwähnt ist.

Nach Helmholtz[2]) bringt die mit einem Windkasten versehene mehrstimmige Sirene, wenn zwei Löcherreihen zusammen ertönen, die stärksten Kombinationstöne hervor, welche fast so laut wie die Primärtöne selbst sind. Hier haben wir also zugleich den Fall, daß der Kombinationston zum Teil physikalisch, zum Teil physiologisch ist, das heißt, nicht nur im Ohre existiert, sondern auch Resonatoren erregt. Trennt man die beiden Primärtöne vollständig, indem man für jeden eine besondere Sirene nimmt, so bleibt nur der subjektive Anteil des Kombinationstones übrig. Helmholtz hat Versuche ähnlicher Art am Harmonium angestellt und daraus gefolgert, daß der größere Teil der Intensität des Kombinationstones dem Ohre entstammt. Er sagt darüber a. a. O., er habe die Windleitungen in dem Instrumente so eingerichtet, daß ein Ton von den unteren, mit dem Fuße getretenen Bälgen aus mit Luft versehen wurde, ein zweiter von dem vorher vollgepumpten und durch Ausziehen des sogenannten Expressionszuges nachher abgeschlossenen Reservebalge, und sodann die Kombinationstöne nicht eben viel schwächer gefunden als bei der gewöhnlichen Anordnung[3]). Ich selbst habe zu dem gleichen Zweck Appunnsche Zungenkasten benutzt, indem die Primärtöne abwechselnd das eine Mal an einem und demselben, das andere Mal an getrennten Kasten angegeben wurden. Da die Wirkung der physikalischen Kombinationstöne des „Dreiklang-Apparates“[4]) auf Resonatoren sogar noch etwas deutlicher ist als beim Harmonium, so kann man auf diese Weise sehr bequem den subjektiven und den objektiven Differenzton des nämlichen Primärtonpaares in Bezug auf Tonhöhe, Intensität, Farbe und Lokalisation vergleichen, was von Bedeutung für die Frage ist, inwiefern und in welchem Grade die zur Kombinationstonbildung führenden physikalischen und physiologischen Prozesse miteinander übereinstimmen oder nicht.

Sind die Primärtöne h und t anfangs unison und läßt man ihre Distanz sukzessive wachsen, so treten zunächst an Schnelligkeit allmählich zunehmende Schwebungen auf und dann bei einer gewissen Frequenz der letzteren ein äußerst tiefer, brummender Differenzton $h - t$. Unter der Voraussetzung, daß die Kombinationstöne im Trommelfell in analoger Weise entstehen wie in Telephon- und anderen Membranen, ist a priori anzunehmen, daß die Schwingungszahl des tiefsten hörbaren subjektiven Differenztones

1) Vgl. hierzu C. Stumpf, Tonpsychologie, Bd. II, S. 245 ff., Leipzig 1890.

2) Lehre v. d. Tonempfindungen, 5. Ausgabe, S. 259 ff., Braunschweig 1896.

3) Nach Hermann (Pflügers Arch. f. d. ges. Physiol., Bd. 122, S. 436, 1908) liefert aber das Harmonium auch noch bei völlig getrennten Windräumen objektive Differenztöne und ist die Bedingung für deren Entstehung die, daß die Zungen an einem gemeinsamen Holzkörper befestigt sind.

4) S. oben Seite 266.

für alle Höhenlagen der Primärtöne die gleiche ist und auch nicht prinzipiell verschieden von derjenigen des tiefsten einfachen, von einer äußeren Tonquelle ausgehenden Tones. Immerhin gehören aber nähere Feststellungen hierüber zu den Aufgaben der Physiologie des Hörens.

W. Preyer[1]) konnte den Differenzton 32 ebenso bei den Tönen von 1024 und 992 v. d. wie in tieferen Lagen sofort erkennen. Im Allgemeinen war der Differenzton 24 gleichfalls noch deutlich; bei 18 wurde aber die Wahrnehmung zweifelhaft und bei 12 war in der Regel keine Spur mehr zu bemerken. Nur unter besonders günstigen Umständen ergaben Metallzungen von noch nicht 16 Schwingungen Unterschied, wie 500 und 512, einen sehr tiefen Ton, von dem Preyer indessen meint, daß er ein Kombinationston von Obertönen gewesen sein dürfte. In der Tat ist ja auch, falls die Primärtöne von den Tönen $2h$ und $2t$ mit genügender Intensität begleitet werden, der Differenzton $2(h - t)$ zu erwarten, der mit $h - t$ versehmolzen oder allein an dessen Stelle gehört werden kann, eventuell noch verstärkt durch $3(h - t)$ und $4(h - t)$, die Differenztöne der Duodezimen und Doppeloktaven der primären Grundtöne. Auf eine solche Mitwirkung von Obertönen möchte auch ich es zurückführen, daß ich, am Appunnschen Tonmesser in mittleren Oktaven experimentierend, zuweilen schon bei 10 Schwebungen einen äußerst tiefen Nebenton konstatiert habe. Man muß also mit obertonfreien Primärtönen arbeiten, wenn man Täuschungen beim Aufsuchen der Schwingungszahl des tiefsten Differenztones ausschließen will. Von selbst geschieht das bei den ganz hohen Tönen, deren Obertöne weit über die obere Hörgrenze hinausfallen. In den mittleren Regionen wären Interferenzapparate zur Auslöschung der Obertöne anzuwenden. Liegen die Primärtöne sehr tief, etwa unterhalb G, so wird es auch für geübte Ohren schwierig, die tiefsten Differenztöne aus dem Klange der schon an sich tiefen Primärtöne herauszuhören, so daß ein zuverlässiges Urteil nicht mehr möglich ist. In allen Fällen muß man aber Primärtonquellen benutzen, von denen wenigstens die eine kontinuierlich verstimmbar ist, also Laufgewicht-Gabeln, am besten auf Resonanzkasten, Tonflaschen mit Wasserfüllung, Sternsche Tonvariatoren oder Galtonpfeifen, und die Tonhöhendistanz, bei welcher die Wahrnehmung des Differenztones eben beginnt, durch Schwebungszählungen oder auf andere Weise sorgfältig ermitteln.[2])

Der Differenzton erster Ordnung ist wohl der am häufigsten vorkommende und in mancher Beziehung wichtigste Kombinationston, aber bekanntlich keineswegs der einzige. Stellt man sich, ohne zunächst irgend welche experimentelle Befunde zu berücksichtigen, auf den rein heuristischen Standpunkt, daß je zwei Primärtöne immer einen Differenzton und einen Summationston erwarten lassen, so liefert schon ein einzelnes Primärtonpaar rechnerisch eine unendliche Anzahl von Kombinationstönen. Bilden wir nämlich aus den Primärtönen h und t die Kombinationstöne erster Ordnung $h - t$ und $h + t$ und betrachten wir sodann letztere als neue Primärtöne, so erhalten wir die weiteren Kombinationstöne höherer

1) Üb. d. Grenzen d. Tonwahrnehmung, Cap. I: Die tiefsten Töne; S. 15, Jena 1876.

2) Vgl. hierzu Karl L. Schaefer. Die Bestimmung der unteren Hörgrenze: Zeitschr. f. Psychol. und Physiol. d. Sinnesorg., Bd. 21, S. 161 ff., 1899.

Ordnung $2h - t$, $2h + t$, $\pm(2t - h)$, $2t + h$, $2h$ und $2t$; diese sechs Töne, wiederum sowohl mit den vier vorigen als auch unter sich, jeder mit jedem anderen additiv und subtraktiv zusammengesetzt, ergeben abermals neue Kombinationen u. s. f. Die allgemeine Formel für sämtliche Tonbildungen solcher Art lautet: $K = \pm m \cdot h \pm n \cdot t$, worin m und n ganze Zahlen oder Null bedeuten.

Es fragt sich nun, welche Kombinationstöne bei sukzessiver Erhöhung von h gegenüber t gleichzeitig oder einander ablösend in Wirklichkeit gehört werden, und wie sich etwa die Verhältnisse mit der Höhenlage von t ändern. Die erschöpfende Bearbeitung dieses Problems erfordert naturgemäß einen ganz erheblichen Aufwand von Mühe und instrumentellen Mitteln. In der Literatur sind bereits zahlreiche mehr oder weniger zuverlässige Einzelbeobachtungen und auch systematische Studien in engerem Rahmen niedergelegt; den wesentlichsten Fortschritt aber verdanken wir einer neueren, überaus gründlichen, exakten und umfassenden Arbeit von C. Stumpf[1]), welche für weitere Untersuchungen dieser Art in verschiedener Hinsicht vorbildlich sein wird.

Ein Haupterfordernis ist es, solche Obertöne von h und t auszuschalten, welche zu Täuschungen Veranlassung geben könnten. Denn solange beispielsweise der Teilton $2t$ im Klange der Primärtöne enthalten ist, darf man den Differenzton $2t - h$ nicht mit voller Sicherheit als von h und t allein erzeugt betrachten. Auch der Summationston $h + t$ läßt sich mathematisch von Obertönen herleiten, und zwar in mehrfacher Form als Differenzton höherer Ordnung. Es ist nämlich:

1) $h + t = h + t + ah - ah$
oder $h + t = ah - [(a - 1)\,h - t]$

2) $h + t = h + t + at - at$
oder $h + t = at - [(a - 1)\,t - h]$

3) $h + t = h + t + ah - ah + at - at$
oder $h + t = [ah - (a - 1)\,t] - [(a - 1)\,h - at]$

4) $h + t = h + t + ah - ah + bt - bt$
oder $h + t = [ah - bt] - [(a - 1)\,h - (b + 1)\,t]$

5) $ah = bt$; $h + t = h + t + ah - bt$
oder $h + t = (a + 1)\,h - (b - 1)\,t$

6) $ah = bt$; $h + t = h + t + bt - ah$
oder $h + t = (b + 1)\,t - (a - 1)\,h$ [2])

Das souveräne Mittel zur Beseitigung der Obertöne ist die Interferenz. Man wählt dazu am besten den auf Seite 297 beschriebenen und abgebildeten Apparat[3]). Das Zimmer, in welchem sich die Schallquellen befinden, muß

1) Beobachtungen über Kombinationstöne; Zeitschrift f. Psychologie, Bd. 55, 1910.

2) Zitiert aus meinem Artikel „Gehörssinn" in Nagels Handbuch d. Physiologie, Bd. III, S. 530, Braunschweig 1905. Die Formeln sind nur anwendbar, sofern die vorkommenden Differenzen positiv sind; a und b sind als ganze Zahlen zu verstehen.

3) Vgl. F. Krueger, „Beobachtungen über Zweiklänge", Wundts Philos. Studien, Bd. 16, Heft 3 u. 4, 1900 und „Zur Theorie der Kombinationstöne", ebenda, Bd. 17, Heft 2, 1901 sowie C. Stumpf a. a. O.

durch mindestens einen Raum von dem Beobachtungszimmer, woselbst auch die Interferenzvorrichtung aufzustellen ist, getrennt sein, damit der Schall eben ausschließlich durch die Röhre dem Hörer übermittelt wird. Stumpf empfiehlt, das Ohr nicht direkt an die Mündung der letzteren anzudrücken, weil dadurch die Obertöne wieder zum Vorschein kommen könnten, und bei starken Tönen sogar mit dem Kopfe ungefähr 10 cm von der Rohröffnung entfernt zu bleiben. Der Intensitätsverlust, den die Grundtöne auf dem Wege durch die lange Leitung etwa erleiden, ist durchaus kein unbedingter Nachteil für die Wahrnehmung der Kombinationstöne. Diese sind vielmehr gerade bei leisen Primärtönen gelegentlich besonders deutlich, während in unmittelbarer Nähe der stark erregten Tonquellen durch die Intensität der Klänge selbst sowie durch Blasegeräusche, Beitöne und dergleichen die feinere Analyse der Klangkomponenten häufig erschwert ist. Man wird daher im Allgemeinen lieber nicht im Schallerzeugungsraume beobachten; indessen machen sich andererseits auch viele leise Kombinationstöne zunächst nur in der Umgebung der Primärtonquellen bemerkbar.

Es ist zweckmäßig, in das Anfangsende der Röhrenleitung im Schallzimmer Trichter zur Aufnahme der primären Klänge einzufügen. Kommen die Töne trotzdem zu schwach ins Hörzimmer hinüber, dann kann man diese Trichter durch passend gestimmte Resonatoren ersetzen und solche überdies noch (mit der nötigen Vorsicht) im Beobachtungsraume benutzen.

Steht nur eine einzige Röhrenleitung zur Verfügung, so läßt sich die sehr wichtige optimale Abstufung des Intensitätsverhältnisses der Primärtöne auch in der Weise erreichen, daß man nur den einen durch die Röhre sendet und den anderen erst im Hörzimmer dem Ohre näher oder ferner hinzubringt. Die Obertöne des letzteren muß man hierbei freilich mit in den Kauf nehmen, was aber in manchen Fällen, namentlich wenn es sich um relativ leise tönende Laufgewichtgabeln handelt, unschädlich sein dürfte. Stumpf hat dies Verfahren öfter mit Vorteil benutzt. Es ist zugleich, wie er hervorhebt, das sicherste Mittel, die Entstehung objektiver Kombinationstöne zu verhüten, wenn sie aus gewissen Gründen ausgeschlossen werden sollen [1]).

Hat man einen bestimmten Kombinationston der Primärklänge h und t sicher konstatiert, sodann eine Tabelle aller jener Teiltöne, welche rechnungsmäßig die Ursache dieses Tones sein könnten, angelegt und danach die verdächtigen Obertöne einwandfrei beseitigt, so beweist das etwaige Verschwinden des fraglichen Tones mit den Obertönen noch nicht ohne Weiteres seine Abhängigkeit von diesen. Man muß nun noch prüfen, ob er nicht mit der Verstärkung eines der Primärtöne wiederkehrt, ob nicht durch die Interferenzvorrichtung auch abgesehen von den Obertönen wesentliche Umstände geändert sind und ob andere Klangquellen das gleiche Resultat geben.

Bleibt ein Kombinationston selbst bei völligem Fehlen des betreffenden Obertones bestehen, so fragt es sich ferner, ob er direkt durch h und t hervorgerufen wird oder doch noch als ein Kombinationston höherer Ordnung

1) A. a. O., S. 93f., berichtet Stumpf über die Beobachtung eines objektiven Summationstones $h + t$, der aller Wahrscheinlichkeit nach in der metallenen Wand der Schalleitungsröhre seinen Ursprung hatte.

anzusehen ist. Man wird hier zu berücksichtigen haben, ob die in letzterem Sinne als seine Erzeuger in Betracht kommenden Töne vorhanden und von genügender Stärke sind. Auch Vergleichsversuche lassen sich zur Entscheidung heranziehen, wie folgendes Beispiel erläutern mag[1]). Der Differenzton $2t - h$ wird häufig sehr deutlich neben $h - t$ gehört und zwar ganz unabhängig von dem Oberton $2t$. Gibt man dann den Ton t mit einem neuen Primärton zusammen an, der dieselbe Schwingungszahl sowie möglichst dieselbe Stärke wie $h - t$ hat, und bleibt dabei der Differenzton (nunmehr erster Ordnung) $t - [h - t] = 2t - h$ aus, so wird er auch im ersteren Falle unmittelbar auf die Primärtöne h und t anstatt auf eine Kombination von t mit $h - t$ zurückzuführen sein.

Jeder Differenz- oder Summationston, dessen Existenz zuverlässig behauptet werden soll, muß, wie Stumpf mit Recht fordert, von dem Beobachter seiner absoluten Höhe nach bestimmt werden können. Angaben, wie „ein tiefer Nebenton“, „ein Brummen“, und dergleichen genügen nicht. Das Aufsuchen des gehörten Tones am Appunnschen Tonmesser kann wegen der ungleichen Stärke- und Klangfarbenverhältnisse sowohl Oktaventäuschungen als auch kleinere scheinbare Verschiebungen veranlassen. Selbst zum Vergleiche direkt ans Ohr gehaltene Stimmgabeln, die vermeintlich von derselben Höhe wie der Kombinationston sind, gewähren noch keine unbedingte Sicherheit; erfährt doch der Ton einer tiefen, der Gehörgangsöffnung zu nahe gebrachten Gabel eine subjektive Vertiefung, die bis zu einer kleinen Terz gehen kann. Das einzige völlig exakte Mittel sind Schwebungen mit einem Hilfstone und deren Auszählung. Damit kann und muß in kritischen Fällen einerseits die Höhe der beiden Primärtöne, andererseits jene des Kombinationstones präzise eruiert werden, womit dann zugleich festgestellt ist, ob die wirkliche Schwingungszahl des letzteren mit der etwa vorher berechneten übereinstimmt.

Daß sich die „schwebende Hilfsgabel“ überdies zum Nachweise leisester Kombinationstöne vorzüglich eignet, ist nach dem auf Seite 385f. Gesagten selbstverständlich. Stumpf hat denn auch bei seinen im Vorstehenden nun schon mehrfach zitierten „Beobachtungen über Kombinationstöne“ ausgiebigen Gebrauch davon gemacht und teilt hierüber die folgenden Regeln und Winke mit. Sind bei größter Aufmerksamkeit keinerlei Schwebungen zu bemerken, so ist dies ein entscheidendes Kriterium für das Nichtvorhandensein des gesuchten Kombinationstones. Sind hingegen Schwebungen da, so muß man zuvörderst sorgfältig prüfen, ob sie nicht vielleicht von einem Obertone der Hilfsgabel oder von einem neuen, durch letztere in den Gesamtklang hineingebrachten Kombinationstone herrühren.

Es sei z. B. die Frage gestellt, ob bei dem Zusammenklange zweier Primärtöne von den Schwingungszahlen 400 und 700 auch der Differenzton 100 entsteht. Läßt dann eine Hilfsgabel von 103 Schwingungen tatsächlich 3 Schwebungen hören, so könnten diese rechnungsmäßig auf die beiden Kombinationstöne $400 - 103 = 297$ und $700 - 400 = 300$, die zusammen ebenfalls 3 Schwebungen ergeben würden, bezogen werden. Ausschlaggebend ist in solchem Falle einmal die Intensität der Hilfsgabel.

1) C. Stumpf, a. a. O., S. 42ff.

Schwebungen derselben mit einem schon von vorneherein vorhandenen Kombinationstone treten nur bei leisem Anschlag auf, und je schwächer der Kombinationston selbst ist, desto mehr muß es auch die Gabel sein, wenn deutliche Schwebungen zustande kommen sollen. Um dagegen mit einem der Primärtöne einen neuen Kombinationston zu bilden, der mit einem anderen Differenzton schweben kann, muß die Hilfsgabel verhältnismäßig stark tönen. Zweitens ist es bei langsamen Schwebungen für den Geübten meistens möglich, mit Bestimmtheit zu sagen, auf welchem Tone er sie hört, ob also im angenommenen Beispiele der Gabelton 100 oder der Ton 300 schwebt.

In einem anderen Falle sei etwa das Intervall 500:800 auf den Differenzton 100 zu untersuchen. Wenn die Hilfsgabel 103 wiederum Schwebungen verursacht, so könnten solche aus der Kollision des Kombinationstones $2 \times 500 - 800$ mit der Oktave der Hilfsgabel herstammen. Hier liefert aber der Umstand, daß diese beiden Töne (200 und 206) miteinander 6 Schwebungen in der Sekunde, die Töne 100 und 103 jedoch nur 3 geben würden, die Entscheidung, welche freilich eine sehr genaue Abstimmung der Tonhöhen zur Voraussetzung hat.

Mit Vorteil verwendete Stumpf die schwebende Hilfsgabel auch zum Aufsuchen der bei Intervallen jenseits der Oktave nur noch allein zu beobachtenden Töne $h - t$ und $h + t$. Die Versuche wurden in der Weise angestellt, daß bloß der Primärton t im Schallzimmer kräftig erzeugt und durch die Röhre unter Ausschaltung der nächsten Obertöne ins Hörzimmer geleitet wurde, während h, eine Gabel auf Resonanzkasten, erst im letzteren hinzukam. Mit einer nahezu auf $h - t$ gestimmten Hilfsgabel, deren Intensität durch Variation der Entfernung vom Ohre passend abgestuft werden konnte, ließ sich zunächst, wenn sie leise tönte, der Kombinationston $h - t$ nachweisen. Klang dagegen die Hilfsgabel $h - t + \delta$ stark ins Ohr, während die Gabel h geschwächt wurde, so schwebte letztere, und zwar offenbar mit dem Summationstone $t + (h - t + \delta)$. Somit konnte der Summationston auf demselben Wege durch eine leichte Veränderung im Abstande der beiden Gabeln vom Kopfe des Beobachters konstatiert werden wie der Differenzton. Ließ man endlich die beiden Gabeln h und $h - t + \delta$ laut ertönen und den Primärton t, indem man sich weiter von der Röhrenmündung entfernte, schwächer, so hörte man Schwebungen von t mit dem Differenzton $h - (h - t + \delta)$ der beiden Gabeln. Es schwebt also derjenige von den drei Tönen, welcher sehr leise im Verhältnis zu den beiden anderen ist, infolge der Bildung des ihm nahe liegenden Kombinationstones.

Als die für die Beobachtung günstigste Frequenz der Hilfsschwebungen bezeichnet Stumpf etwa 2 bis 8 Stöße pro Sekunde. In der Tat ist auch der regelmäßige Rhythmus solcher langsamen Schwebungen ein sehr charakteristisches und eindringliches Phänomen. Gelegentliche Täuschungen sind freilich, zumal für den weniger Geübten, möglich, indem leichte Schwankungen der Gabel in der Hand oder periodische Intensitätsänderungen der Empfindung, die vom Pulsschlage herrühren, für Schwebungen gehalten

1) A. a. O., S. 26.

werden. Gegen dergleichen Irrtümer kann man sich aber dadurch schützen, daß man die Hilfsgabel sukzessive um geringe Beträge verstimmt und auf die entsprechende Änderung in der Schnelligkeit der Stöße achtet oder die Frequenz der letzteren durch Auszählen seitens mehrerer Beobachter einwandfrei bestimmen läßt.

Berichtigungen.

In Bd. II, Abt. 1, S. 42, Zeile 19 von oben sind die Worte „und Gruber“ hinzuzufügen.

In Bd. II, Abt. 2, S. 67 hat sich ein Irrtum eingeschlichen. Die dort gegebene Erwähnung einer angeblich von Grützner herrührenden Methode zur Pepsinbestimmung bezieht sich in Wahrheit auf eine alte Methode von Grünhagen[1]).

Er ließ Fibrin mit HCl quellen, brachte gleiche Volumina dieser Gallerte auf gleiche Filter und übergoß mit gleichen Mengen verschieden starker Pepsinlösung. Die in gleichen Zeiten durch das Filter fließende Menge gelösten Fibrins galt als das Maß der verdauenden Kraft.

Grützner[2, 3, 4]) hat das Prinzip, die Menge gelösten Fibrins direkt zu messen, zur Ausarbeitung einer besseren Methode benutzt.

Sie ist von Korn[5]) und Wojwodoff[6]) nachgeprüft und für gut brauchbar gefunden worden. Sie beruht darauf, daß Fibrin einen aufgenommenen Farbstoff fest bindet, daß dieser aber bei Lösung des Fibrins auch in Lösung geht, und zwar im Verhältnis zum Ausmaß dieser Auflösung. Wenn man also die in Lösung gehende Farbstoffmenge kolorimetrisch mißt, hat man ein direktes Maß für die verdaute Fibrinmenge. Zur Vergleichung dienen ca. 10 bestimmt abgestufte Farbstofflösungen (0,1; 0,2; 0,3 usw. zu 20,0 Wasser). Für Pepsin benutzt man Karmin, für Trypsin Spritblau. Bringt nun die eine Pepsinlösung den Farbenton I, eine andere IV hervor, so ist im zweiten Versuch 4mal so viel Fibrin gelöst als im ersten.

Die modernste Ausführung der Methode findet sich in der bei Grützner ausgeführten Arbeit von Waldschmidt[7]). Er benutzt für beide Bestimmungen, sowohl Pepsin wie Trypsin, eine Lösung von 0,5 g Spritblaubläulich (Bayer & Co.) in 1 l Glyzerin zur Färbung des Fibrins.

Zu einem Verdauungsversuche mit Trypsin wird das gefärbte Fibrin auf einem Seiher mit Wasser ausgewaschen, einige Zeit in 0,1 proz. Sodalösung

---

1) Grünhagen, A., Neue Meth., die W. d. Magensaftes zu messen. Pflügers Arch. V, 203 (1872).

2) Grützner, P., Üb. e. neue Methode, Pepsinmengen kolorim. zu messen. Pflügers Arch. VIII, 452 (1874) u. Neue Unt. üb. die Bildg. u. Aussch. d. Pepsins. Hab.-Schr. Breslau 1875.

3) Grützner, Ein Beitr. z. Mechan. d. Magenf. Pflügers Arch. 106, 463 (1905).

4) Grützner, P., Versuche u. Betracht. über meine Methode, Pepsin kolorim. zu bestimmen. Arch. di fisiol. VII, 223 (Festschrift für Fano) 1909.

5) Korn, A., Üb. Meth., Pepsin quant. zu best. Inaug.-Diss., Tübingen 1902.

6) Wojwodoff, St., Üb. d. Meth. d. Pepsinbest. Inaug.-Diss., Berlin 1907.

7) Waldschmidt, W., Über die verschied. Meth., Pepsin und Trypsin quant. zu bestimmen usw. Pflügers Arch. 143, 189 (1911).

gebracht, auf einer Glasplatte fein zerschnitten und dann mit reiner Sodalösung abgespült. Gleiche Mengen dieses blauroten Fibrins werden in einige gleichweite Reagenzgläser, welche gleichviel 0,1 proz. Sodalösung (etwa 10 ccm) enthalten, übertragen. Dort senken sich die feinen Fibrinflocken zu Boden und sollen in allen Gläsern gleichhoch, etwa 1 cm hoch stehen. Dann werden steigende Trypsinmengen zugefügt und gemischt. Der Grad der Zersetzung und damit der Verdauung ergibt sich aus der Intensität der Färbung der Suspensionsflüssigkeit, die in einem Keilkolorimeter ermittelt wird.

Zu einem Verdauungsversuche mit Pepsin wird das Fibrin in 0,1 proz. Salzsäurelösung eingetragen, worin es quillt und dunkelblau aussieht. Der Versuch wird dann in ganz analoger Weise wie mit Trypsin fortgeführt, nur daß als Suspensionsflüssigkeit statt 0,1 proz. Sodalösung 0,1 proz. Salzsäurelösung benutzt wird.

Grützner[8]) hat neuerdings noch ein spezielles Kolorimeter angegeben.

In Bd. III, Abt. 2, S. 138, Zeile 16 und 17 von oben muß es statt „Konkavgläsern“ bzw. „Konkavlinsen“ heißen: „Konvexgläsern“ bzw. „Konvexlinsen“.

8) Grützner, P., Ein einfacher Kolorimeter nebst Bemerk. über d. Verdauungskraft von „reinem Pepsin“. Pflügers Arch. 144, 545 (1912).